



Institut d'Economie
Rurale

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du DIPLÔME de MASTER 2

Spécialité : AGRONOMIE ET AGRO-ALIMENTAIRE

Option : Agronomie et Systèmes de Culture Innovants

**Analyse de l'évolution à long terme de l'écart de rendement du sorgho
dans une rotation coton-sorgho-arachide plus ou moins intensifiée**

Approche par modélisation

Par

AMADOU TRAORE

Année de soutenance : Septembre 2015

Organisme d'accueil : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) – Montpellier, Unité AÏDA, France.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du DIPLÔME de MASTER 2

Spécialité : AGRONOMIE ET AGRO-ALIMENTAIRE

Option : Agronomie et Systèmes de Culture Innovants

**Analyse de l'évolution à long terme de l'écart de rendement du sorgho
dans une rotation coton-sorgho-arachide plus ou moins intensifiée**

Approche par modélisation

Par

AMADOU TRAORE

Mémoire préparé sous la direction de :

Jacques WERY

Présenté : le 18/09/2015

Devant le jury :

Jacques WERY

Rémi GAUDIN

Nicolas BERTRAN

Organisme d'accueil : CIRAD

Maîtres de stage

François AFFHOLDER,

Aude RIPOCHE

RESUME

En zone Soudano-sahélienne du Mali, les systèmes de culture les plus couramment pratiqués sont des rotations coton-céréales ou coton-céréales-légumineuses. La culture du coton bénéficie plus d'apport de fertilisants de la part des agriculteurs que les cultures céréalières qui bénéficient de l'effet résiduel des applications d'engrais organiques et minéraux utilisés sous le cotonnier. Plusieurs études ont montré l'insuffisance d'apport de fertilisation minérale ou organique pour le maintien des rendements élevés des cultures à long terme dans la zone subsaharienne. Dans cette étude, nous avons utilisé un essai longue durée conduit en station de recherche agronomique de N'tarla au Mali pour étudier l'évolution des rendements. Dans cet essai, une rotation coton-sorgho-arachide a été soumise à différents niveaux de fertilisation organo-minérale en deux périodes distinctes. Il s'agit d'un traitement sans engrais (CT), un traitement recevant de l'engrais minéral (IF), un traitement recevant de la fumure organique (OF) et une combinaison de la fertilisation organo-minérale (OIF). La première période va de 1965 à 1979 et la seconde de 1980 à 1989. L'objectif de l'étude est d'identifier la part du climat et celle de la fertilisation organo-minérale dans l'évolution des rendements constatée dans l'essai. Pendant la première période, seul le coton a bénéficié de l'apport d'engrais organique et minéral. En seconde période le sorgho a bénéficié aussi de l'engrais organique et minéral. Le traitement de contrôle (CT) non fertilisé durant la première période a reçu de l'engrais chimique en seconde période. L'évolution des rendements a été étudiée à partir de l'analyse de l'écart entre les rendements observés (Y_a) de quatre niveaux de fertilisation et un rendement potentiel limité par l'eau « Water limited yield » (Y_w) à l'aide d'un modèle de simulation (PYE). En première période de l'expérimentation, l'écart de rendement était plus important pour les traitements CT et IF ($3,04 \text{ Mg ha}^{-1}$, $2,33 \text{ Mg ha}^{-1}$) que pour les traitements OF et OIF ($2,12 \text{ Mg ha}^{-1}$, $1,72 \text{ Mg ha}^{-1}$). L'apport de la matière organique a montré un effet significatif sur l'amélioration des rendements pendant cette période. Quelle que soit la quantité des pluies enregistrées le rendement relatif du traitement OIF était toujours proche du potentiel par rapport aux autres traitements durant cette période. En seconde période, l'écart de rendement était similaire pour tous les traitements quel que soit le niveau d'apport de fertilisant ($1,34 \text{ Mg ha}^{-1}$, $1,12 \text{ Mg ha}^{-1}$, $1,19 \text{ Mg ha}^{-1}$ et $1,13 \text{ Mg ha}^{-1}$) respectivement pour CT, IF, OF et OIF. La forte fertilisation OIF n'a montré aucun effet significatif sur l'amélioration des rendements dans le temps par rapport aux autres traitements fertilisés. Une forte variabilité interannuelle a été constatée entre les rendements pendant l'expérience. Cette variabilité des rendements implique des risques et incertitude importants qui pourraient expliquer les échecs des démarches d'intensification classique en zone subsaharienne à savoir l'utilisation de la fertilisation intensive (minérale et/ou organique).

Mots clés : système de culture, fertilisation, modèle de culture, potentiel yield estimator, rendement potentiel limité par l'eau, écart de rendement.

ABSTRACT

Long-term analysis of the evolution of sorghum yield gap in a cotton-sorghum-groundnut rotation more or less intensified: Modeling approach

In Sudano Sahelian zone of Mali, the most commonly practiced cropping systems are cotton-cereal rotations or cotton-cereal-legumes. Cotton cultivation benefits from more input of fertilizers by farmers that grain crops, which benefits from the residual effect of fertilizers applied in cotton. Several studies have shown that mineral or organic fertilization insufficiently contributed to maintain high yields for long-term crops in the Saharan area.

We conducted a long trial at the Agricultural Research Station N'Tarla in Mali to study the evolution of yields. A cotton-sorghum-groundnut rotation was subjected to various organic fertilizers and mineral levels in two distinct periods. This is a treatment without fertilizer (CT), a treatment receiving mineral fertilizer (IF), receiving treatment of organic fertilizer (OF) and a combination of organic and mineral input (OIF). The first period goes from 1965-1979 and the second from 1980-1989. This study aims at identify the part of climate and the one of organic and mineral fertilization in the crop yield variability. During the first period, only cotton benefited from the input of organic and mineral fertilizers. In the second period sorghum also benefited from these fertilizers. The control treatment, unfertilized during the first period received chemical fertilizer in the second period. Changes in yields were analyzed through quantification of differences between the observed yield of four levels of fertilization and the water limited yield calculated by a modeling approach using the Potential Yield Estimator model. In the first half of the experiment, the yield gap was greater for CT and IF treatments (3.04 Mg ha^{-1} and 2.33 Mg ha^{-1} respectively) than for OF and OIF treatments (2.12 mg ha^{-1} and 1.72 mg ha^{-1} respectively). Organic matter input significantly improved yields during this period. Whatever the amount of rainfall recorded relative performance OIF treatment was still close to potential compared to other treatments during this period. In the second period, the performance gap was the same for all treatments regardless of the level of fertilizer input (1.34 Mg ha^{-1} , 1.12 Mg ha^{-1} , 1.19 Mg ha^{-1} and 1.13 Mg ha^{-1}), respectively for CT, IF, OF and OIF. High fertilization levels didn't significantly improve yields over time compared to lower fertilization levels. A strong inter-annual variability was observed between yields during the experiment. This variability of returns involves important risks and uncertainties that could explain the failures of traditional intensification of efforts in sub-Saharan area namely the use of intensive fertilization (mineral and / or organic).

Keys words: cropping system, fertilization, crop model, potential yield estimator, potential yield limited by water, yield gap.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adressent à mon maître de stage, François AFFHOLDER, pour m'avoir permis d'effectuer ce stage au sein de l'unité AÏDA du CIRAD mais aussi de renforcer ma capacité au métier de la recherche Agronomique ;

Mes sincères remerciements à Aude RIPOCHE pour son suivi régulier et son implication totale dans ce stage ;

Je remercie également Sadrine AUZOUX, statisticienne en poste au CIRAD, pour le temps passé à me former à l'utilisation de bases de données ;

Mes remerciements à Eric SCOPEL chef de l'unité AÏDA au CIRAD pour son soutien et à travers lui, je remercie tout le personnel du CIRAD Lavalette - Montpellier ;

Je remercie vivement Jacques WERY, mon tuteur de stage de Montpellier SupAgro, pour sa grande disponibilité et précieux conseils donnés avant et pendant le stage ;

Je tiens à remercier Léo GARCIA, stagiaire Ingénieur PVD, pour ces précieux conseils tout au long de ce stage ;

Ce stage conclut une année de formation à Montpellier SupAgro ; je profite donc de ces quelques lignes pour saluer l'équipe encadrant de l'option « Productions Végétales Durables » dont j'ai pu apprécier les qualités pédagogiques et relationnelles, ainsi que la promotion PVD 2014 – 2015 pour sa cohésion, son entraide et sa bonne humeur ;

Je tiens à remercier Amadou A YATTARA sélectionneur coton, Fagaye SISSOKO et Bouba TRAORE tous deux Agronomes, Alain RENOUX Entomologiste, Alassane BAH et Sory I SIDIBE tous Zootechniciens, Kadri OUSMANE NOUHOU Forestier, El Hadj Mamoudou KASSAMABRA Sélectionneur coton et Yaya KONE phytopathologie riz tous pour leur soutien tout au long de cette formation ;

Je remercie la Direction de L'IER, le D/CRRA-Sikasso, tout le personnel du programme coton de l'IER et de la station de N'tarla ;

Je ne saurai terminer sans remercier vivement le Gouvernement Français à travers l'Ambassade de France au Mali pour m'avoir octroyé cette bourse de formation de Master 2, et le gouvernement de la République du Mali pour m'avoir accordé un congé de formation, qu'ils trouvent à travers ces quelques lignes toute ma reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

RESUME	3
ABSTRACT	4
REMERCIEMENTS	5
TABLE DES MATIERES	6
TABLEAUX	7
FIGURES	7
SIGLES ET ACRONYMES	8
I. INTRODUCTION	9
II. MATERIEL ET METHODE	11
2.1 Zone d'étude.....	11
2.2 Présentation de la base de données.....	12
2.3 Dispositif expérimental de l'essai longue durée de N'Tarla	13
2.4 Présentation de la situation climatique pendant la durée de l'expérimentation.....	14
2.5 Description du profil type du sol de la zone d'étude.....	15
2.6 Présentation du modèle Potentiel Yield Estimator (PYE).....	16
2.6.1 Le Modèle conceptuel de PYE	16
2.6.2 Principaux processus	17
2.6.3 Paramétrage du modèle	22
2.6.4 Calage du modèle pour les stades phénologiques	25
2.7 Simulation du rendement potentiel et l'écart de rendement	26
2.8 Analyse statistique.....	26
III. RESULTATS	27
3.1 Calage et validation du Modèle.....	27
3.1.1 Calage du modèle pour les stades phénologiques	27
3.1.2 Calage du rendement grain.....	29
3.2 Estimation du rendement permis par l'eau	30
3.3 Estimation de l'écart des rendements	31
3.4 Gestion de la fertilité du sol à long terme.....	32
4. DISCUSSION	34
4.1 Paramétrage du modèle	34
4.2 Estimation du rendement limité par l'eau (Yw)	34
4.3 Causes de la variabilité des rendements	35
4.4 Intérêt de l'estimation de Yw par rapport à l'analyse de stabilité	37
5. CONCLUSION.....	38

6. BIBLIOGRAPHIE.....	39
7. ANNEXE	43
Annexe 1 : Liste des paramètres du modèle	43
Annexe 2 : Ecart de rendement et pluie enregistrée par période	44
Annexe 3 : Ecart moyen absolu entre Yw et les rendements observés en première période de l'expérience.	45
RESUME	47

TABLEAUX

Tableau 1 : Quantités de nutriments appliquées aux trois cultures de la rotation sous contrôle	14
Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques du sol de N'tarla (Laboratoire des sols, Sotuba, Mali 1994).....	16
Tableau 3 : Estimation de la réserve utile par horizon du sol de N'tarla.....	23
Tableau 4 : Valeurs des principaux paramètres utilisés dans le modèle PYE obtenues dans la littérature	24
Tableau 5: Ajustement de la durée des stades simulés et observés	29
Tableau 6 : Constantes thermiques après paramétrage du modèle	29
Tableau 7 : Valeurs des paramètres obtenues par calage du modèle.....	30
Tableau 8 : Ecart moyen absolu entre Yw et les rendements observés en moyenne en première et seconde période de l'expérience.....	31

FIGURES

Figure 1: Evolution des rendements du sorgho au cours du temps de l'essai longue durée de N'tarla :	10
Figure 2 : Localisation et limite pluviométrique de la zone d'étude	12
Figure 3 : Situation climatique pendant la durée de l'expérience :	15
Figure 4 : Pluie annuelle enregistrée au cours de l'expérimentation.....	15
Figure 5 : Schéma conceptuel de PYE.	17
Figure 6 : Stade de développement dans PYE.....	19
Figure 7 : Dynamique du LAI, de la Biomasse et élaboration de rendement grain :	22
Figure 8 : Effet des dates de semis sur la durée du cycle :	28
Figure 9 : Comparaison du nombre de jour observé et simulé de la floraison en fonction de la date de semis.....	28
Figure 10 : Water limited Yield :	30
Figure 11: Rendement relatif moyen en fonction de la fertilisation par période :.....	32
Figure 12 : Evolution du rendement relatif dans le temps pendant la première période (1965-1979) ..	33

Figure 13 : Evolution du rendement relatif en fonction du temps en seconde période (1980-1989)	33
Figure 14 : Ecart moyen de rendement entre Yw et Ya et pluie enregistrée : Période 1 de l'expérience	44
Figure 15 : Ecart moyen de rendement entre Yw et Ya, et pluie enregistrée : Période 2 de l'expérience.	44

SIGLES ET ACRONYMES

AÏDA	Agro-écologie et Intensification Durable des cultures Annuelles
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CMDT	Compagnie Malienne de Développement des Textiles
CEC	complexe d'échange cationique
°CJ	degré jour
CTstades	Constante thermique du stade (somme de température seuil de changement de stade)
IER	Institut d'Economie Rurale
IRCT	Institut de Recherche Coton et Textiles
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
SupAgro	Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques de Montpellier
OHVN	Organisation de la Haute Vallée du Niger
PYE	Potentiel Yield Estimator
YG	Ecart de rendement

I. INTRODUCTION

Le contexte de l'agriculture au Mali, comme dans la plupart des pays sahéliens est caractérisé par la faiblesse des précipitations et surtout leur très forte variabilité temporelle et spatiale (Baron et al., 2005; Sultan et al., 2008). Le secteur agricole joue un rôle important dans l'économie du Mali. Il contribue à hauteur de 49% du Produit Intérieur Brut (PIB) et occupe 80% de la population active (B. Traoré, 2007). Dans la région Soudano-sahélienne, les systèmes de culture les plus couramment pratiqués sont des rotations coton-céréales ou coton-céréales-légumineuses. La culture du coton est la principale source de revenu pour les agriculteurs constitués en majorité par des petites exploitations familiales tandis que les céréales sont généralement utilisées pour l'alimentation des familles. La production du coton représente 8% du PIB au Mali et fait partie des principales cultures commerciales sur lesquelles le Mali a fondé son développement rural (Fao, 2010). Le coton, dans la mesure où il permet des entrées d'argent bénéficie de la fertilisation, et ces apports fertilisants profitent généralement aux céréales qui suivent le coton dans la rotation (Pouya et al., 2013). Or, le recours à la fertilisation organo-minérale est souvent jugé insuffisant par les agronomes pour assurer le maintien à long terme de rendements élevés des cultures (Kanté, 2001; Pol & Traore, 1993; Pablo Tittonell & Giller, 2013).

Il existe donc depuis de très longues années, un débat sur l'évolution de la fertilité des sols selon le niveau d'apports de fertilisants organiques et minéraux dans le sol. Pour certains, l'insuffisance des apports organiques provoque une perte de la capacité du sol à supporter une production, et l'efficacité de la fertilisation diminue de manière à ce qu'elle devienne de plus en plus irréversible à long terme (Kintché, Guibert, Bonfoh, & Tittonell, 2015). Pour d'autres, les apports de fertilisants sont certes insuffisants pour obtenir des rendements élevés, mais les propriétés du sol évoluent peu et même après une longue période sans apports organiques, la réponse des cultures à des apports fertilisants reste la même (Pieri, 1989; Ripoche et al., 2015). Pour étudier l'efficacité de la fertilisation, une des stratégies possibles est de comparer les rendements de deux périodes distinctes pendant lesquelles le sol est supposé évoluer sous l'influence de régimes de fertilisation organo-minérale contrastés.

Une expérimentation de longue durée a été conduite en station de recherche Agronomique de N'tarla au Mali entre 1965 et 1989. Dans cet essai, une rotation coton-sorgho-arachide a été soumise à différents niveaux de fertilisations organiques et minérales. A partir de 1980, la fertilisation reçue par traitements a changé. L'exemple du sorgho est présenté dans cette étude, car la plante est connue pour bien répondre à des niveaux de fertilisation contrastés, ainsi qu'aux variations de pluviométrie. De plus, le modèle utilisé a déjà été validé pour

simuler le rendement limité par l'eau (Yw) des céréales (Affholder, Poeydebat, Corbeels, Scopel, & Titttonell, 2013) d'où l'intérêt du sorgho par rapport aux autres espèces de la rotation. Les détails de l'essai sont décrits dans la partie méthode. Une des difficultés d'interprétation de cet essai concernant l'évolution au cours du temps de la fertilité du sol est que la pluviométrie varie naturellement d'une année à l'autre. Du fait de l'interaction entre la pluviométrie et les traitements, les variations temporelles des différences de rendement (*figure 1*) entre traitements ne peuvent être imputées à la seule évolution temporelle des propriétés du sol.

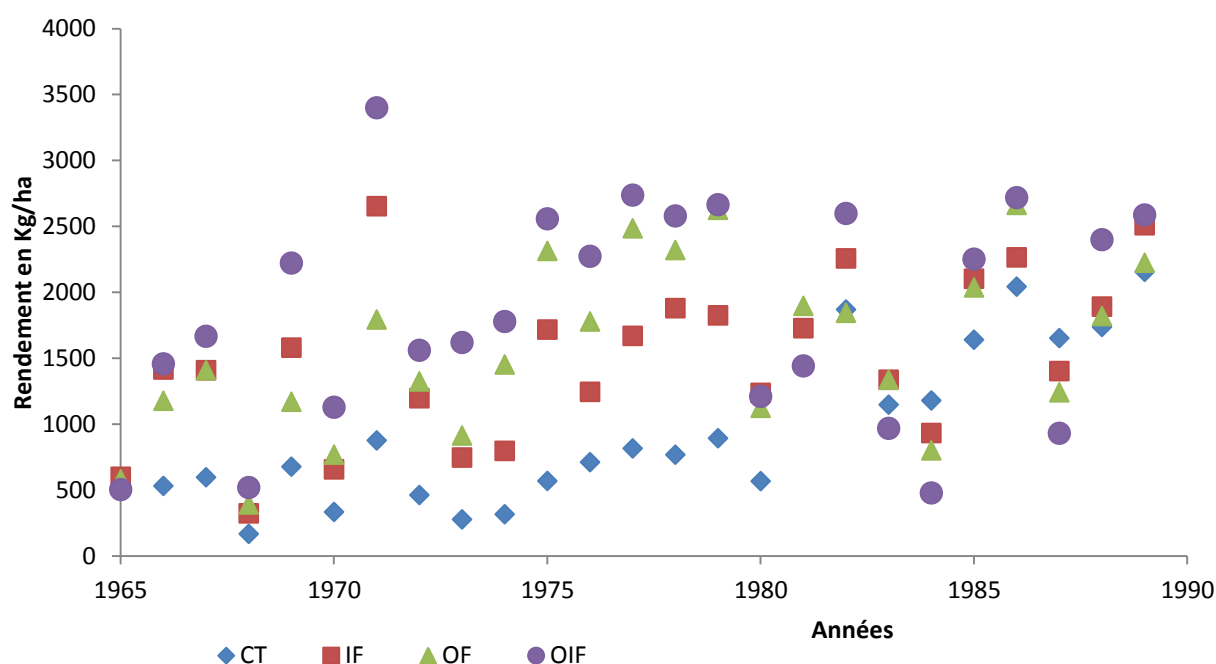


Figure 1: Evolution des rendements du sorgho au cours du temps de l'essai longue durée de N'tarla :

Traitement de contrôle (CT), engrais organique (OF), engrais inorganique (IF), engrais organique et inorganique (OIF) utilisés pour la période 1 (1965-1979) et la période 2 (1980-1989) de l'expérience à N'Tarla au Sud du Mali. Le sorgho n'est pas fertilisé pendant la période 1.

Dans une interprétation récente de cet essai, (Ripoche et al., 2015), ont proposé de résoudre cette difficulté en ayant recours à une analyse dite « stabilité », dans laquelle ce ne sont pas les rendements obtenus chaque année qui sont analysés directement, mais le rapport entre le rendement de chaque traitement chaque année et la moyenne des rendements de l'essai cette même année. Cette moyenne dite « environnementale », est supposée représenter la fluctuation interannuelle de l'environnement qui ne serait pas due aux traitements. Si la fertilité des sols évolue au cours du temps en fonction des traitements, cela a une influence sur la moyenne, qui n'est pas indépendante elle-même de cette évolution.

Dans la présent étude on se propose de réaliser, une nouvelle analyse de cet essai avec une approche alternative à cette « étude de stabilité », en étudiant les écarts de rendements « **yield**

gaps » entre les rendements mesurés dans l'essai et le rendement limité par l'eau, c'est à dire le rendement qui aurait été obtenu chaque année si les seuls facteurs déterminant le rendement avaient été le rayonnement solaire, la température et la pluviométrie (Ittersum & Rabbinge, 1997). Pour y parvenir, nous allons mobiliser le modèle PYE (Potentiel Yield Estimator) Affholder et al. (2013) et la base de données de l'essai longue durée de N'tarla. Les objectifs de l'étude sont donc :

- d'identifier la part du climat et celle de la fertilisation organo-minérale dans l'évolution des rendements constatées dans l'essai pour la culture du sorgho ;
- d'évaluer l'intérêt de la méthode utilisée pour les études d'évolution à long terme de la fertilité des sols dans les régions à forte contrainte hydrique.

Pour atteindre ces objectifs un certain nombre de questions vont constituer le fil de la démarche à savoir :

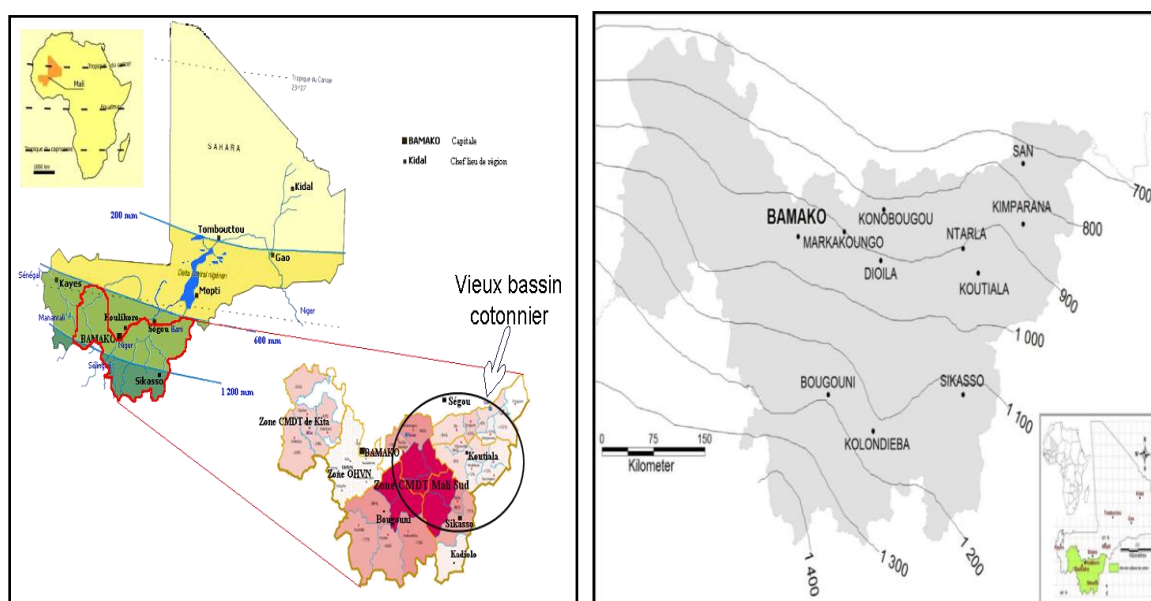
- ✓ Le modèle PYE permet-il d'estimer avec une bonne précision le rendement permis par l'eau dans les conditions de l'essai ?
- ✓ Quelle est la part du climat dans la variabilité des rendements du sorgho enregistrés dans cet essai ?
- ✓ Quelle est la part de la variabilité des rendements du sorgho due à l'effet cumulé de la gestion de la fertilité du sol à long terme dans cet essai?

II. MATERIEL ET METHODE

2.1 Zone d'étude

Le climat dans le sud du Mali est typique de la zone soudano-sahélienne. La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 800 et 1000 mm (B. Traoré et al., 2013). La zone d'étude N'Tarla (12°35N, 5°42 W, 302m) est située au cœur du vieux bassin cotonnier (Koutiala) du Mali (figure 2) à environ 350 km au Nord de la capitale du Sud-Mali (Sikasso). La saison des pluies va de mai à octobre et la température moyenne saisonnière est de 29°C. Les systèmes de culture les plus couramment pratiqués dans la zone sont des systèmes mixtes agro-sylvo-pastoraux axés autour de la culture du coton (*Gossypium hirsutum* L.). Principale culture de rente, le coton est très souvent cultivé en rotation avec les céréales comme le sorgho (*Sorghum bicor* (L) Moench), le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.), le maïs (*Zea mays* L.) et les légumineuses comme l'arachide (*Arachis hypogaea* L.), le niébé (*Vigna unguiculata* (L) Walp.). Dans le système, le coton et le maïs reçoivent le plus d'apport de nutriments sous forme de fumure organique et/ou d'engrais chimique et bénéficient le plus de protection phytosanitaire. Les bovins, les caprins et les ovins sont les principales espèces d'élevage. Les

agro-éleveurs pratiquent généralement l'agriculture sédentaire mais en raison de la taille des troupeaux souvent importante et du manque des ressources alimentaires, la transhumance est pratiquée pendant la saison sèche. Les sols du site expérimental sont fortement altérés et classés en Lixisols (Fao, 2006). Ils ont une texture de sable limoneux (<10% d'argile) à la surface, mais sont plus riches en argile en profondeur (30% à 60 cm de profondeur). Le carbone organique du sol est faible (0,3%), le pH est d'environ 6 et le CEC est inférieur à 3 cmol (+) kg⁻¹ (B. Traoré et al., 2013). Ce sont des sols typiques de la région.



(Bélières, 2009)

(B. Traoré et al., 2013)

Figure 2 : Localisation et limite pluviométrique de la zone d'étude

2.2 Présentation de la base de données

La base qui a servi à notre étude est constituée par les données collectées dans le cadre de l'expérimentation à long terme d'un système de culture à base coton en station de recherche Agronomique de N'tarla au Mali. L'expérience a commencé en 1965 et portait sur une rotation coton-sorgho-arachide. Dans la base existe une série de données climatique au pas de temps journalier. Il s'agit des températures journalières (Tmin et Tmax), du rayonnement global (Rg), de la vitesse du vent, de l'humidité relative, l'altitude de la zone et la pluviométrie. Les stades phénologiques du sorgho et les rendements observés pendant la durée de l'expérience ont également été enregistrés.

2.3 Dispositif expérimental de l'essai longue durée de N'Tarla

L'expérience a été mise en place en 1965 à la station de recherche agronomique N'Tarla de l'institut d'économie rurale (IER) du Mali (12°35N, 5°42 W, 302 mètres d'altitude) afin de déterminer l'impact à long terme des systèmes de culture à base de coton sur la gestion de la fertilité des sols (IRCT, 1969). Elle a été menée pendant 25 années jusqu'en 1989. Le dispositif a été mis en place selon un plan en blocs de Fisher avec trois cultures (coton, sorgho, arachide) en trois séries (S1, S2, S3) dans le cadre d'une rotation avec quatre niveaux de fertilisation en quatre répétitions. Initialement, une rotation des cultures coton-sorgho-arachide sur trois ans a été utilisée. A partir de 1968, la rotation des cultures était de 4 ans coton-sorgho-arachide-sorgho et en 1976 la rotation est revenue à 3 ans coton-sorgho-arachide. Dans le cadre de la rotation de quatre ans, le sorgho a été semé sur deux séries en fonction de l'année et sur la troisième série était semée le coton ou l'arachide. Les cultivars utilisés pendant les trois et quatre années de rotations étaient : BJA 592 (1965-1977), puis SM67 (1978) et B163 (1970-1989) pour le coton ; la variété Thiémarifing pour le sorgho ; les variétés 56-160 (1965-1969) et 28-206 (1970-1989) pour l'arachide. Au début de l'expérience, les quatre niveaux de fertilisation étaient : un traitement de contrôle sans engrais (CT), un traitement recevant de l'engrais organique (OF), un traitement recevant de l'engrais minéral (IF) et un traitement recevant une combinaison d'engrais organique et minéral (OIF). Dans le but de limiter la baisse de la fertilité des sols, les niveaux de fertilisation ont été modifiés à un moment donné de l'expérience, amenant à distinguer deux périodes : période1 (1965-1979) ; période2 (1980-1989). Au cours de la première période (15 ans) de l'expérience, l'engrais minéral et le fumier 9 tonnes MS ha⁻¹ ont été appliqués seulement au coton. Pendant cette période, le traitement de contrôle n'a pas reçu d'engrais minéral. À partir de la seconde période (10 ans), l'engrais minéral a été attribué aux trois cultures ainsi qu'aux traitements de contrôle. Les quantités d'engrais appliquées pendant l'expérience sont détaillées dans le (*tableau 1*). Le fumier a été appliqué à la dose de 6 tonnes MS ha⁻¹ pour le coton et 3 tonnes de MS ha⁻¹ pour le sorgho. La Dolomie a été appliquée aux traitements OIF et IF à la dose de 360 kg ha⁻¹ pour le coton et 120 kg ha⁻¹ pour le sorgho par an. Pendant toute la durée de l'expérience, l'engrais organique a été appliqué avant le dernier travail de sol précédant les semis, l'engrais minéral a été divisé en deux applications et incorporé dans le sol pour éviter les pertes par volatilisation. Le complexe coton NPK a été appliqué à l'émergence des plantes et l'urée au buttage (environ 45 jours après semis). Les résidus de coton et du sorgho ont été retirés des parcelles pendant la première période et incorporés en seconde période. Les résidus de l'arachide ont été incorporés dans le sol pendant la durée de l'expérience. La lutte contre

les mauvaises herbes et les ravageurs a été effectuée sur tous les traitements selon les normes recommandées par l'institut de recherche agricole local (IER/CMDT/OHVN, 1998).

Tableau 1 : Quantités de nutriments appliquées aux trois cultures de la rotation sous contrôle

(CT), engrais organique (OF), engrais inorganique (IF), et engrais organique et inorganique (OIF) utilisées pour la période 1 (1965-1979) et la période 2 (1980-1989) de l'expérience à N'Tarla au Sud du Mali. Le sorgho et l'arachide ne sont pas fertilisés pendant la période 1.

			Inorganic fertilizer					Organic fertilizer					
			N	P	K	Ca	Mg	Dry manure	N	P	K	Ca	Mg
			(kg ha ⁻¹)					(t ha ⁻¹)	(% in dry manure ^a)				
Cotton	Period 1	CT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		OF	0	0	0	0	0	12.8	1.8	0.4	2.7	0.9	0.5
		IF	21 ^b	30	0 ^b	19	0	0	0	0	0	0	0
		OIF	21 ^b	30	0 ^b	19	0	12.8	1.8	0.4	2.7	0.9	0.5
	Period 2	CT	51	20	23	0	0	0	0	0	0	0	0
		OF	0	0	0	0	0	6.6	1.4	0.4	1.7	0.8	0.5
		IF	90	30	83	96	43	0	0	0	0	0	0
		OIF	90	30	83	96	43	6.6	1.4	0.4	1.7	0.8	0.5
Sorghum	Period 2	CT	60	10	12	0	0	0	0	0	0	0	0
		OF	0	0	0	0	0	3.3	1.4	0.4	1.7	0.8	0.5
		IF	60	10	12	26	14	0	0	0	0	0	0
		OIF	60	10	12	26	14	3.3	1.4	0.4	1.7	0.8	0.5
Groundnut	Period 2	CT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		OF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		IF	21	18	0.15	46	0.33	0	0	0	0	0	0
		OIF	21	18	0.15	46	0.33	0	0	0	0	0	0

^a Nutrients are expressed in % of dry manure averaged over each period.

^b Indicate that N and K inputs changed into 90 and 83 kg ha⁻¹ respectively from 1976 to 1979.

(Ripoche et al., 2015)

2.4 Présentation de la situation climatique pendant la durée de l'expérimentation

Les conditions climatiques mensuelles pendant la durée de l'expérience sont présentées dans la **(figure 3)**. Les températures maximales ont varié entre 32 et 40 °C et les minimales entre 10 et 23 °C. La température moyenne observée pendant l'expérience était de 27°C et la pluviométrie moyenne enregistrée était de 824 mm. Dès le mois de mars, des quantités de pluies moins importantes sont enregistrées et elles sont suivies par des longues périodes de sécheresse et une augmentation des températures faisant en sorte qu'aucune culture ne peut se développer sans apport d'eau. A partir du mois de mai, la fréquence des pluies augmente, des cultures comme le coton et le maïs sont mis en place dans la zone, puis le sorgho et les autres cultures. La plus forte quantité de pluie a été observée en 1965 (1231 mm) et la plus faible en 1984 (482 mm) **(Figure 4)**. La date de semis la plus précoce du sorgho pendant l'expérience était le 04 juin 1981 et la date la plus tardive le 18 juillet 1973.

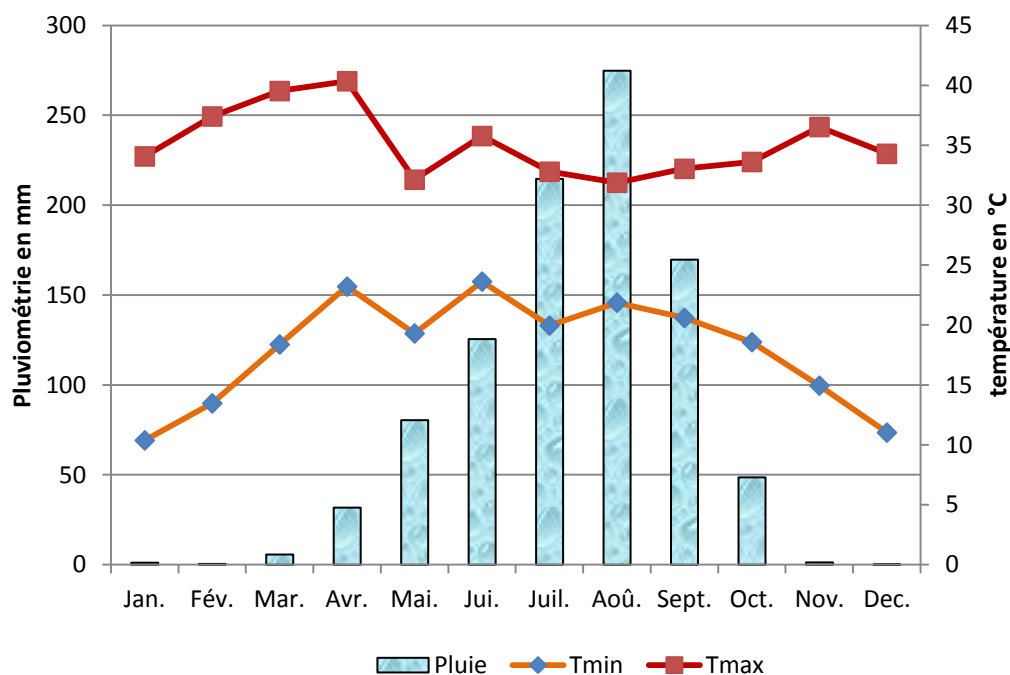


Figure 3 : Situation climatique pendant la durée de l'expérience :

Tmin = température minimale ; Tmax = température maximale

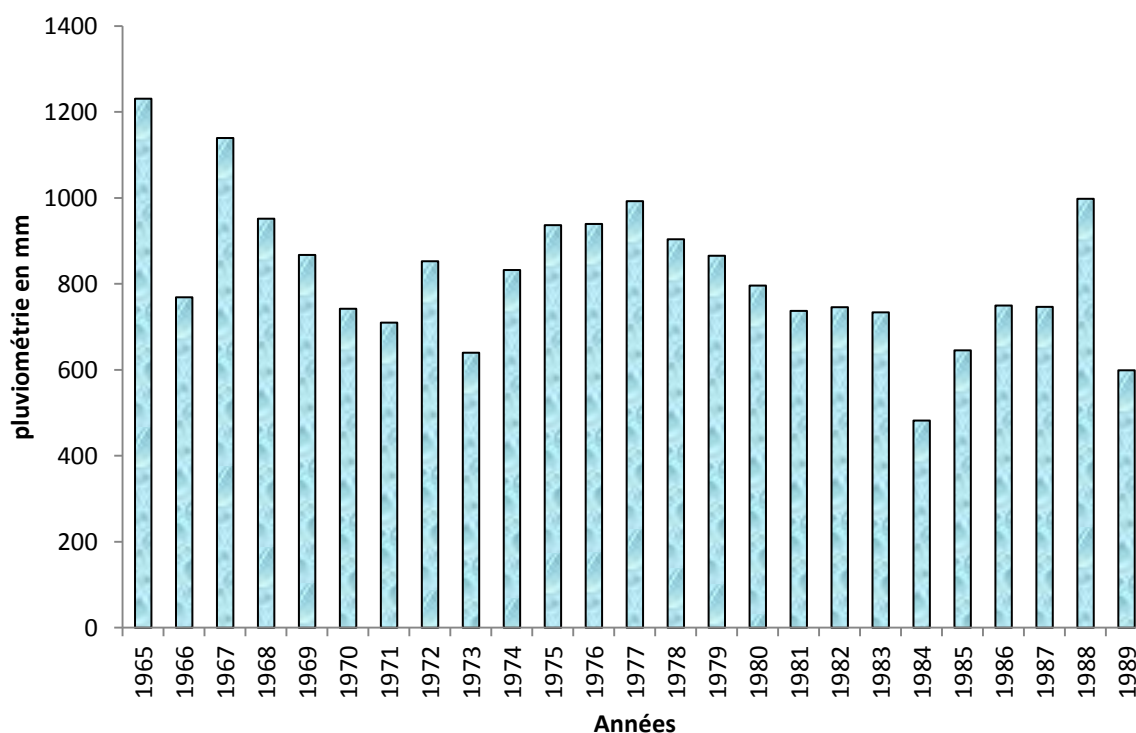


Figure 4 : Pluie annuelle enregistrée au cours de l'expérimentation

2.5 Description du profil type du sol de la zone d'étude

Le sol de N'tarla selon (Ballo, 1997) est très poreux et la texture est de type limoneux sableux, fondue avec une cohésion forte et une transition graduelle en surface. Selon la même

source, ce sol présente des éléments grossiers ferromanganifères, des tâches de forme nodulaire en concrétions en profondeurs. Le **tableau 2** donne les caractéristiques physico-chimiques du sol de N'tarla.

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques du sol de N'tarla (Laboratoire des sols, Sotuba, Mali 1994)

Horizon en cm	Epaisseur en cm	pH eau	pH kcl	Granulométrie		
				% Argile	% Limons	% Sables
0-25	25	5,4	4,3	3,8	30,4	65,8
25-60	35	6,2	4,8	17,7	30,7	51,5
60-110	50	5,8	4,6	29,4	23,4	47,3

Source : (Ballo, 1997)

2.6 Présentation du modèle Potentiel Yield Estimator (PYE)

PYE est un modèle de simulation de rendement des cultures. Il a déjà été validé pour plusieurs espèces (maïs, soja, riz) et des environnements subhumide à semi-aride (Affholder et al., 2012). Le principal effort à faire pour rendre le modèle utilisable dans cette étude est d'estimer les paramètres propres au sorgho, et notamment au cultivar utilisé, et les paramètres du climat, du sol et de la gestion technique de la culture pour les situations culturales étudiées.

2.6.1 Le Modèle conceptuel de PYE

PYE est écrit dans VBasic sous Microsoft Accès. Il utilise un pas de temps journalier et simule la durée d'un cycle de culture en fonction de temps thermique, la dynamique de l'indice de surface foliaire (LAI) au cours du cycle, la production de biomasse totale aérienne résultante l'interception du rayonnement solaire incident par le LAI. La conversion du rayonnement intercepté en biomasse en fonction de la température et le rendement grâce à l'attribution de cette biomasse en grain au cours d'une phase de développement de remplissage de grain est également déterminée par le temps thermique. La plante est supposée être semée à une densité de peuplement « standard » correspondant à la recommandation faite par les services de soutien à l'agriculture pour chaque région. Les coefficients de l'espèce et les propriétés du sol, via le bilan hydrique, influencent les différents flux donc limitent ou augmentent les rendements potentiels finaux atteints. En cas de stress hydrique, le modèle utilise un seuil de la fraction d'eau transpirable du sol au-dessous duquel la croissance du LAI et de la biomasse sont réduites par le stress hydrique.

PYE est donc un modèle permettant de calculer des rendements potentiels en fonction des conditions pédoclimatiques et des caractéristiques de l'espèce. Un module de stress hydrique peut être activé, ce qui permettra dans le cadre de l'étude de déterminer la sensibilité du sorgho aux variations pluviométriques interannuelles puis de simuler un rendement potentiel limité par l'eau (Y_w). Des informations décrivant l'espèce, la variété, le sol, les conditions initiales et l'itinéraire de culture, ainsi que les données météorologiques journalières (températures, pluviométrie, ETP, rayonnement solaire) sont stockées dans la base. Le modèle fonctionne sur un pas de temps journalier pour calculer les composantes de croissance et de développement des plantes. Les sorties sont stockées dans des tables regroupant les données calculées quotidiennement ou des résultats totaux de simulation (rendement, LAI, biomasse, stock d'eau disponible dans le sol, couche de sol atteignable par les racines etc.). La **figure 5** présente le schéma conceptuel de PYE.

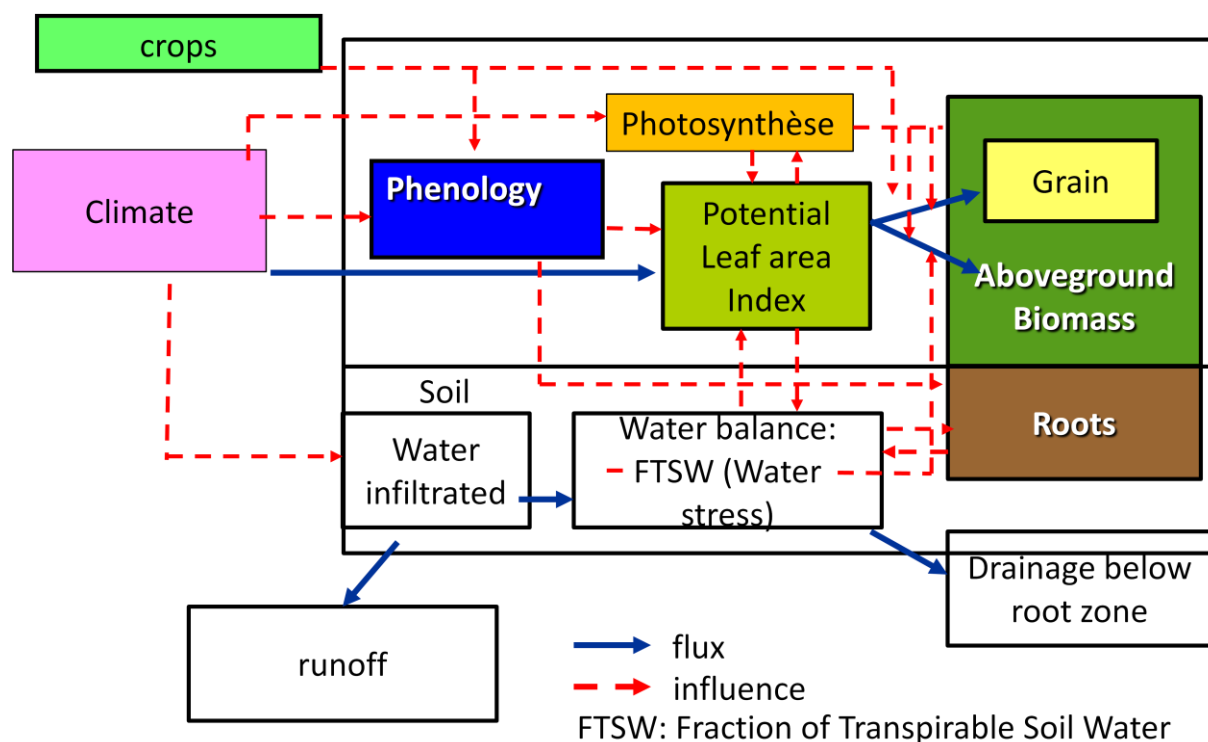


Figure 5 : Schéma conceptuel de PYE.

2.6.2 Principaux processus

2.6.2.1 Description du bilan hydrique du modèle PYE

Le modèle intègre quatre grands réservoirs de stock d'eau de taille variable en fonction de la croissance racinaire. Il s'agit de :

- Un réservoir concerné par l'évaporation et la transpiration en surface (Sturf) de profondeur « Zsurf » ;

- Un réservoir dans la couche de sol colonisée par les racines (Strac) dont la capacité augmente avec la profondeur atteignable par les racines (Zrac). La capacité de ce réservoir peut évoluer au cours du temps avec la croissance racinaire qui peut atteindre son maximum (Zracmax) ;
- Un réservoir dans la couche de sol non colonisé par les racines allant de Zrac à la profondeur maximale de sol considérée (Ztotsol). Ce réservoir peut être subdivisé en deux sous-réservoirs : Stnonrac (couche du sol non encore colonisé par les racines) et Stprofond (couche de sol entre Zracmax et Ztotsol).
- Un réservoir de stock final (StockTot) qui est le stock hydrique total disponible de 0 à Ztotsol et correspond aux trois réservoirs comme suit : $StochTot = Strac + Stnonrac + Stprofond$.

La capacité de stockage en eau du sol est définie par la réserve utile (RU) estimée en hauteur d'eau par cm d'épaisseur du sol.

2.6.2.2 Développement phénologique dans le modèle

Le développement des cultures est simulé en utilisant une approche de temps thermique. On considère qu'une étape donnée du développement i démarrante le jour k est atteinte le jour n si :

$$\sum_{k+1}^n (f(T_m)) = TT(i) \quad (1)$$

Avec: T_m , la température moyenne du jour $(T_{max}-T_{min})/2$ en °C

$TT(i)$ la constante de temps thermiques en degrés jours (°C.J) ;

$f(T_m)$ une fonction définie comme suit : Si $T_m < t_{dmin}$, $f(T_m) = 0$

Si $T_m > t_{dmax}$, $f(T_m) = t_{dmax}-t_{dmin}$

Sinon, $f(T_m) = T_m-t_{dmin}$;

Où t_{dmin} est la température-base en dessous de laquelle le développement de la plante est nul, et t_{dmax} la température-seuil au-dessus de laquelle la vitesse de développement de la plante n'augmente plus.

Les étapes considérées sont représentées dans la **figure 6** : (1) l'émergence, (2) la fin de la phase juvénile correspondant à ralentir la croissance du LAI, (3) la fin de la croissance rapide (LAI_{max}), (4) début de remplissage de grain (fin de la floraison), (5) début de la sénescence et (6) la maturité complète. La vitesse de développement de la plante, régie par la température moyenne journalière, peut être accélérée ou freinée par la photopériode pour les cultivars

sensibles à ce facteur. L'Équation qui permet d'obtenir les paramètres sensibles à la photopériode du modèle est la suivante :

$$\text{PPFAC} = 1 - (\text{DL} - \text{MOPP}) * \text{SensPhot} \quad (2)$$

Où PPFAC, est un facteur de photopériodisme ;

DL, la durée de la longueur du jour ;

MOPP, la période à laquelle la photopériode agit sur la plante et SensPhot, la sensibilité de la plante à la photopériode.

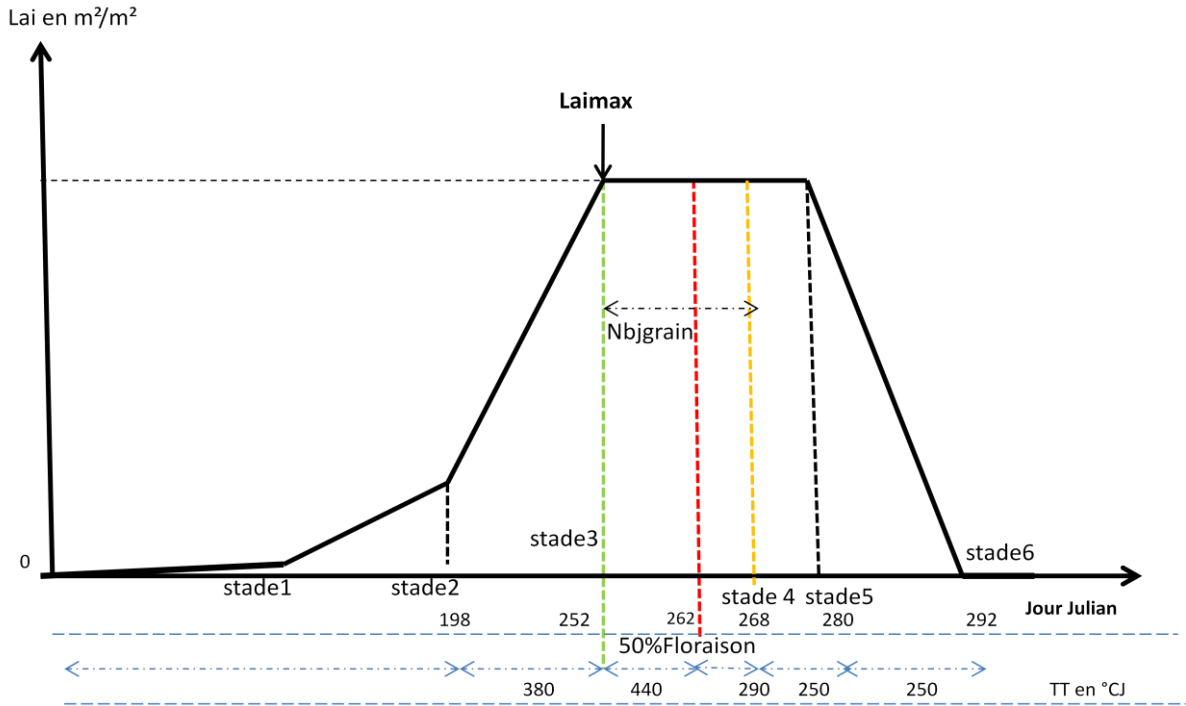


Figure 6 : Stade de développement dans PYE

2.6.2.3 Dynamique de LAI sur le cycle de la culture

Le LAI est une variable clé du modèle car elle est impliquée à la fois dans le déterminisme du rayonnement intercepté pour la photosynthèse et dans celui de la transpiration. Du stade 1 au stade 3 (*figure 6*), le LAI est simulé en utilisant une fonction logistique de temps thermique empruntée au modèle STICS (Brisson et al., 1998). De l'étape 3 à l'étape 5, le LAI est constant. Il diminue ensuite linéairement avec le temps thermique jusqu'à l'atteinte de l'échéance (étape 6). L'équation qui permet la construction du $dLAI$ journalier est donnée ci-dessous :

$$dLAI = \frac{DLaimax}{1 + \exp(5,5 + VLaimax - ULai) * TT * Turfac} \quad (3)$$

Avec :

$dLAI$, le taux de croissance quotidien du LAI

DLAI_{max}, le taux de croissance quotidien maximal du LAI (m².m-2.jour-1)

U_{lai}, unité de développement foliaire

V_{laimx}, U_{lai} au point d'inflexion de la fonction DLAI = f(U_{lai})

TT une fonction définie comme suit : Si $T_m < t_{dmin}$, alors $TT = 0$ Si $T_m > t_{dmax}$, alors $TT = t_{dmax} - t_{dmin}$ Sinon, $TT = T_m - t_{dmin}$

t_{dmin}, température-base en dessous de laquelle le développement de la plante est nul (°C)

t_{dmax} la température-seuil au dessus de laquelle la vitesse de développement de la plante n'augmente plus (°C)

Turfac, coefficient de sensibilité de dLAI au stress hydrique, compris entre 0 et 1 selon le niveau de remplissage de la réserve utile dans la couche de sol occupée par les racines.

L'évolution du LAI dépend d'une unité de développement foliaire U_{lai} qui vaut 1 à la levée et 3 lorsque le LAI aura atteint sa valeur maximale (Brisson et al., 2003). Chaque jour, un incrément de LAI (*dLAI*) est calculé en fonction du temps thermique (*TT*) et d'un paramètre de croissance maximale journalière du LAI en l'absence de tout stress (*DLAI_{max}*) à caler pour le cultivar et la densité de peuplement. Cependant, il peut être modulé par un stress hydrique dans les deux premiers stades de développement si les conditions de culture sont limitantes.

2.6.2.4 Simulation de la biomasse aérienne

La simulation d'interception de la lumière par les feuilles, sa conversion en biomasse et la distribution entre les grains et le reste de la biomasse au dessus du sol ont toutes été empruntées à STICS. Le rayonnement solaire intercepté par les feuilles « *Raint* » est calculé selon la loi d'extinction Beer-Lambert :

$$\mathbf{raint} = 0,95 * \mathbf{parsurRg} * \mathbf{Rg} * (1 - e^{(-coefExtin * LAI)}) \quad (4)$$

Avec : *Rg*, le rayonnement global journalier (MJ.m⁻²)

ParsurRg, la fraction photosynthétique active du rayonnement (PAR/Rg)

CoefExtin, le coefficient d'extinction de la plante pour la culture en question. La valeur du coefficient d'extinction utilisé dans cette étude est de 0,66 citée par (Lemaire, Charrier, & Hébert, 1996)

L'accumulation de la biomasse par jour est calculée selon l'équation suivante :

$$\mathbf{dBiom} = CO2\ fact * WSfact * Ebmax * \mathbf{raint} * (-0,0815 * (\mathbf{raint})^2 * \frac{Ftemp}{100}) \quad (5)$$

Avec :

dBiom, incrément de biomasse quotidienne (T.ha⁻¹.jour⁻¹)

Ebmax, le coefficient de conversion maximal du rayonnement en biomasse

Ftemp, Fonction des températures minimales, maximales et optimales de croissance définissant l'action de la température sur l'accumulation de biomasse aérienne

WSfact, Indice de stress hydrique, compris entre 0 et 1 selon le niveau de remplissage de la réserve utile dans la couche de sol occupée par les racines.

CO2 fact, facteur de réduction par le CO2 de la conversion du rayonnement en biomasse.

2.6.2.5 Elaboration du rendement en grain

Dans le modèle, le rendement grain est calculé en combinant deux équations, l'une déterminant la part de la biomasse affectable aux grains, et l'autre calculant le nombre de grains (Brisson et al., 1998). Le nombre de grain (*Ngrain*) est fixé pendant une phase de durée « *Nbjgrain* » qui précède le début de remplissage du grain (**figure 6**). *Ngrain* dépend de la vitesse de croissance moyenne du couvert (*Vitmoy*) pendant cette période *Nbjgrain* et selon une relation linéaire dont les coefficients *Cgrain* et *CgrainV0* sont dépendants du cultivar.

L'indice de récolte, qui est fonction de la durée de la période de remplissage des grains est calculé à partir d'un taux de croissance journalier de l'indice de récolte et d'un indice de récolte maximal, tous deux spécifiques au cultivar. Un premier rendement en grain est ainsi calculé comme étant le produit de l'indice de récolte final et de la biomasse totale. Un second rendement en grain est calculé comme étant le produit du poids maximal d'un grain et de la valeur simulée du nombre de grains produits par unité de surface (*Ngrain*). Si ce second rendement est inférieur au premier c'est ce calcul qui est retenu, pour rendre compte d'une limitation du rendement, pas le nombre de grain et le poids maximal d'un grain.

$$\text{Grain} = \text{Min}(\text{Biom} * \text{IR}, \text{P1grain} * \frac{\text{Ngrain}}{100}) \quad (6)$$

Avec : *Biom* = Biomasse totale ;

IR, Indice de récolte

P1grainMax, poids maximal d'un grain en gramme

$$\text{Ngrain} = \text{Cgrain} * \text{Vitmoy} + \text{CgrainV0} \quad (7)$$

Ngrain : Nombre de grains par m²

Nbjgrain : période précédant le début de remplissage des grains

Cgrain : pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance pendant la période *Nbjgrain* (grains (g de matière sèche)^{-1.j-1})

Vitmoy: Taux de croissance moyen quotidien pendant la période *Nbjgrain* (g.m^{-2.j-1})

CgrainV0 : Nombre de grains produit quand le taux de croissance *Cgrain* est égal à zéro.

La **figure 7** présente la dynamique du LAI, de la biomasse et l'élaboration du rendement grain pendant deux périodes distinctes de l'expérience.

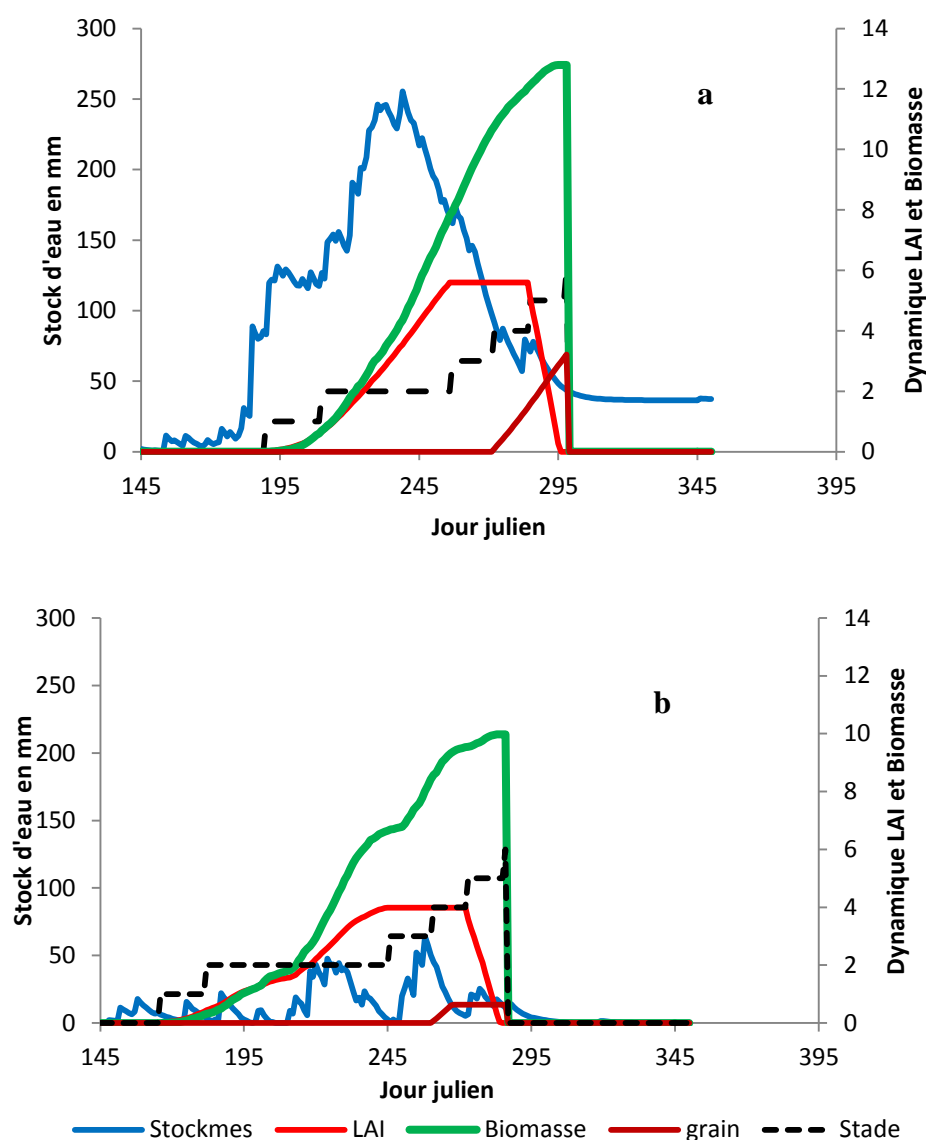


Figure 7 : Dynamique du LAI, de la Biomasse et élaboration de rendement grain :

a = année 1971 ; b = année 1984 ; Stockmes = stock d'eau ; Stade = stade phénologique

2.6.3 Paramétrage du modèle

Le paramétrage du modèle repose principalement sur la méthode utilisée par (Affholder et al., 2013) dans leurs études sur l'analyse des écarts de rendement dans le bassin arachidier du Sénégal. Le modèle a été paramétré dans un premier temps avec des paramètres pour lesquels les valeurs ont été jugées fixes grâce à la littérature (*tableau 4*). Il s'agit du coefficient d'extinction de la plante, du coefficient de conversion maximale de la biomasse, des températures (tdmin, tdmx, tcmn, tcmx, tcop) respectivement les températures de base et maximale de développement, les températures de base, maximale et optimale de conversion de la lumière en biomasse. L'Evapotranspiration Potentielle ETP a été estimée à partir de l'équation de Penman Montheih telle que décrit par (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). La

capacité de rétention d'eau du sol entre le point de flétrissement (pF_{4,2}) et la capacité au champ a été estimée à partir des données disponibles concernant le sol de N'tarla (Tableau 2). Les équations suivantes ont été utilisées pour la détermination de la réserve utile.

$$RU\% = pF(2,5) - pF_{4,2} \quad (8)$$

Où pF(2,5) représente le logarithme du potentiel hydrique à la capacité au champ et pF_{4,2} le logarithme du potentiel hydrique au point de flétrissement.

$$RU \text{ mm} = RU\% * da * \frac{E}{100} \quad (9)$$

Où « da » est la densité apparente ;

« E » l'épaisseur de l'horizon en millimètres. L'équation de la teneur en eau à la capacité de rétention qui correspond au type de sol de la zone d'étude (sols peu plastiques) est :

$$Y = 0,821x + 0,194 \text{ (synthèse atelier, IRAT, 1983)}$$

où Y est la teneur en eau en % et x la teneur en % (Argile + Limon/2).

La réserve utile estimée en fonction de la texture du sol de N'Tarla jusqu'à 110 cm de profondeur est représentée dans le (tableau 3). La RU totale obtenue à cette profondeur est de 179 mm et la RU estimée à 1m de profondeur est de l'ordre de 160 mm.

Tableau 3 : Estimation de la réserve utile par horizon du sol de N'tarla

Horizons du sol en cm	Epaisseur en cm	Capacité au champ pF(2,5) en %	pF (4,2) en %	da	RU en mm
0-25	25	16	5	1,6	42
25-60	35	22	9	1,2	55
60-110	50	25	11	1,2	82

pF(2,5) : capacité au champ, pF (4,2) : humidité au point de flétrissement ; da : densité apparente ; RU : réserve utile.

D'autres paramètres ont été obtenus en second lieu par calage du modèle. Il s'agit de la valeur du coefficient cultural (K_{max}) calé pour le mil par (Affholder, 1997), de la croissance journalière maximale du LAI (D_{laimax}), de l'augmentation journalière de l'indice de récolte (Vitircarb), de la sensibilité de la plante à la photopériode (SensPhot), du seuil de durée de jour à partir duquel la photopériode agit sur le développement (MOPP) et les paramètres C_{grain} et C_{grainV0}.

Pour caler ces deux derniers paramètres, nous avons utilisé l'équation (7). Ne disposant pas d'observations de nombre de grains, nous avons sélectionné deux points de rendement pour

lesquels on a supposé à la fois que le rendement avait été limité par le nombre de grain et le poids d'un grain comme première hypothèse, mais aussi qu'il n'y avait pas d'autres facteurs limitant autre que l'eau dans l'obtention de ces rendements comme seconde hypothèse. Les deux points ont été choisis dans les traitements OIF en excluant les quatre premières années de l'essai (pour répondre à la seconde hypothèse). Le premier point était le plus haut rendement obtenu dans l'essai en supposant que lorsqu'il n'y a aucun stress, on obtient non seulement un nombre de grain important mais aussi tous les grains sont remplis au maximum (*figure 7a*). Le second point était le plus bas rendement, avec un stress hydrique important pendant la période entre la floraison et le début de remplissage de grain (nombre de grain fortement réduit par le stress hydrique, mais le remplissage des grains n'est pas limité par le stress hydrique) (*figure 7b*). La combinaison de nos deux hypothèses nous permet de considérer que le poids d'un grain de l'espèce a atteint son maximum et donc le nombre de grain observé peut être estimé en divisant le rendement mesuré par le poids maximum d'un grain, connu pour le sorgho. Enfin les valeurs (Cgrain, CgrainV0) ont été calculées en considérant l'équation de la droite reliant les deux points dans un graphique du nombre de grains en fonction de Vitmoy simulé. La valeur du paramètre Vitircarb a été obtenue par ajustement.

Tableau 4 : Valeurs des principaux paramètres utilisés dans le modèle PYE obtenues dans la littérature

Paramètres	Description	Unité	Valeurs	Auteurs
Tdmin	température base de développement	°C	8	(Folliard, Traoré, Vaksman, & Kouressy, 2004), (Ritchie and G. Alagarswamy, 1989) ; (Fao., 2012) ; (Luo, 2011), (Alagarswamy G, Ritchie JT. 1991)
Tdmax	température maximale de développement	°C	44	(Folliard et al., 2004), (Ritchie and G. Alagarswamy, 1989) ; (Luo, 2011)
Tcmin	température base de conversion de la lumière en biomasse	°C	20	(Ritchie and G. Alagarswamy, 1989)
Tcmax	température max de conversion de la lumière en biomasse	°C	40	(Ritchie and G. Alagarswamy, 1989)
Tcop	température optimale de conversion de la lumière en biomasse	°C	30	(Ritchie and G. Alagarswamy, 1989)
Ebmax	coefficient de conversion maximale de la biomasse		3,18	(Lemaire et al., 1996)
Extin	coefficient d'extinction du rayonnement		0,66	(Lemaire et al. 1996)

2.6.4 Calage du modèle pour les stades phénologiques

L'estimation des paramètres de sensibilité à la photopériode du cultivar utilisé a consisté à déterminer les valeurs d'un coefficient photopériodique empirique (SensPhot) et du seuil de durée de jour à partir duquel la photopériode agit sur le développement de la plante (MOPP). SensPhot varie entre 0 pour les variétés insensibles à la photopériode à 1 pour les variétés strictement photopériodiques pour lesquelles le raccourcissement de la période végétative compense la variation entre dates de semis (Kouressy, Dingkuhn, Vaksman, & Heinemann, 2008). L'estimation des paramètres de sensibilité à la photopériode a été faite par itération en ajustant le coefficient photopériodique Sensphot et la période à laquelle le photopériodisme agit sur le développement de la culture (Dingkuhn, Kouressy, Vaksman, Clerget, & Chantreau, 2008).

Les stades phénologiques observés sont principalement les dates de levées, de 50% floraison, et de maturité complète. Les mesures de LAImax n'étant pas disponibles dans la base, nous avons calé le modèle à LAImax en considérant que ce dernier atteint en absence de tout stress, une valeur de 6 pour le sorgho 10 jours avant la date 50% floraison observée et se manifeste après la fin de la production des feuilles. PYE calcule la date de LAImax et non une date de floraison. De ce fait la prédiction de la floraison à la date de floraison observée a été faite en considérant que celle-ci est égale à la date de LAImax + 10 jours suivant le modèle : **Floraison = date LAImax + 10**. La date de maturité complète du modèle a été calée à celle observée. L'erreur quadratique moyenne relative a été utilisée pour la détermination de l'écart entre le nombre de jour simulé et observé pour le calage de ces stades phénologiques et le biais pour la détermination de la différence entre le nombre de jour simulé et observé. Les équations de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), de l'erreur quadratique moyenne relative (RMSE divisée par la moyenne des valeurs observées) (RRMSE) et du biais sont les suivantes.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (10)$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}}{\bar{Y}} \quad (11)$$

$$Biais = \bar{X} - \bar{Y} \quad (12)$$

Où x_i et y_i sont respectivement des valeurs observées et simulées, n le nombre d'observation ;
et les valeurs moyennes observées et simulées.

2.7 Simulation du rendement potentiel et l'écart de rendement

Les simulations des rendements potentiels ont été faites par année et pour chacune des parcelles individuellement avec les dates de semis et les types de sol. Cependant, le rendement potentiel (Y_p) est le rendement d'un cultivar lorsqu'il est cultivé avec de l'eau, des éléments nutritifs non limitatif et des stress biotiques effectivement contrôlés (Evans, L.T, 1993; Ittersum & Rabbinge, 1997). Selon Ittersum et al. (2013), lorsqu'un cultivar est implanté dans les conditions qui peuvent atteindre Y_p , le taux de croissance de la culture est déterminé uniquement par le rayonnement solaire, la température, le CO_2 atmosphérique et les traits génétiques régissant la durée de la période de croissance et l'interception de la lumière par le couvert végétal. Dans les zones sans contrainte majeure du sol, Y_p est la référence la plus pertinente pour les systèmes sous climats humides. Pour les cultures pluviales, le rendement limité par l'eau (Y_w) équivalent d'un rendement potentiel limité par l'eau est la référence la plus pertinente. Par contre, le rendement actuel ou observé (Y_a) est défini comme étant le rendement effectivement atteint ou observé dans le champ d'un agriculteur ou d'une parcelle d'expérimentation. Après calage, le modèle PYE donne accès à un rendement potentiel limité par l'eau (Y_w) (Affholder et al., 2012). L'analyse des rendements a été faite à partir de Y_a , Y_w , les écarts moyens de rendement entre les rendements potentiels modélisés (Y_w) et les rendements des parcelles de l'essai Y_a ont été calculés. Le rendement relatif $Y_r = Y_a/Y_w$ a été calculé afin d'étudier la variabilité des rendements au cours du temps.

2.8 Analyse statistique

La procédure générale modèle linéaire (GLM) a été utilisée pour analyser l'effet des quatre traitements (CT, IF, OF, OIF) sur le rendement au cours du temps. Les périodes 1 et 2 de l'expérience ont été analysées séparément. Les effets des traitements ont été considérés comme significatifs lorsque $p < 0,05$, et les différences significatives entre les moyennes de traitement ont été détectées avec des tests de LSD.

Les analyses statistiques, les analyses de variance (ANOVA) suivi du test de Tukey ont été effectués au seuil de 5% à l'aide du logiciel statistique R version 3.2.1 Core team 2015. Les quatre traitements (CT, IF, OF, OIF) ont été étudiés en fonction du temps et pendant les deux périodes de l'expérience.

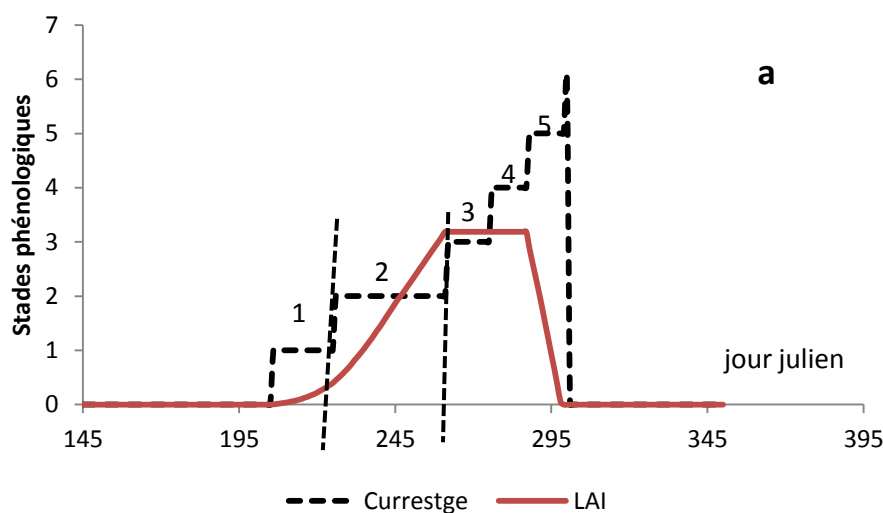
III. RESULTATS

3.1 Calage et validation du Modèle

3.1.1 Calage du modèle pour les stades phénologiques

Les valeurs pour lesquelles le calage du modèle a été jugé bon pour l'estimation des paramètres de sensibilité à la photopériode ont été de 1 pour la sensibilité à la photopériode (Sensphot) et 12,75 heures pour que la photopériode agisse sur le développement de la plante (MOPP).

Ainsi, dans le modèle cinq situations sont distinguées et correspondent à cinq stades phénologiques (*tableau 6*). Du fait de la photopériode, le cycle de la culture peut être rallongé ou raccourci en fonction de la date de semis et de la longueur du stade 2 (croissance rapide à LAImax) (*figure 8*). Pour un semis tardif du 18 juillet en 1981 (*figure 8a*) le nombre de jour qui sépare le semis à l'obtention du LAImax est de 57 jours avec une somme de température qui varie de 396°Cj et 1050°Cj. Par contre, pour un semis précoce du 04 juin en 1973 (*figure 8b*) le nombre de jour entre le semis et LAImax est de 98 jours pour une somme de température variant de 393°Cj et 1683°Cj. Plus la date de semis est tardive plus la période qui sépare la levée à la floraison est courte et plus la date de semis est précoce plus la période de la floraison est longue.



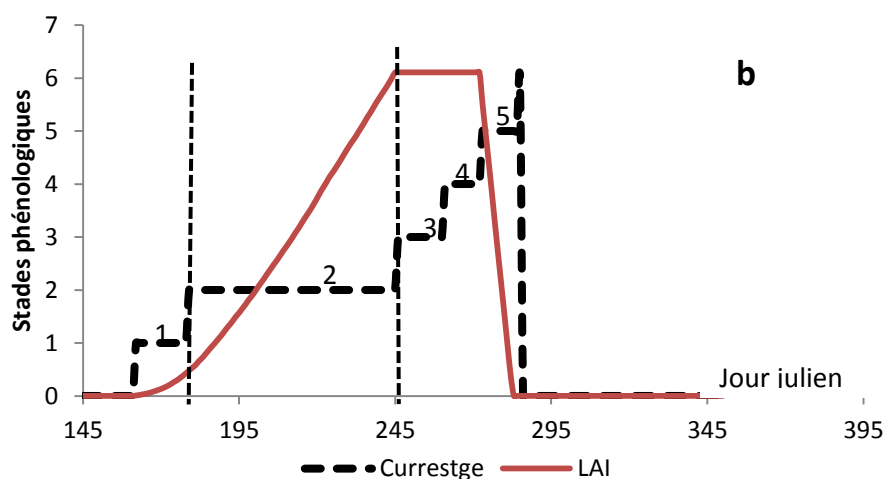


Figure 8 : Effet des dates de semis sur la durée du cycle :

a : semis tardif du 18 juillet en 1973 ; b : semis précoce du 04 juin en 1981. Currestge = Stade phénologique en cours

La prédiction des dates de floraison correspond bien aux dates d'observation (*figure 9*). L'erreur quadratique moyenne relative entre le nombre de jour simulé et observé du semis à la floraison ($L_{\text{imax}} + 10$ jours) est de 4,4% avec un biais de moins d'un jour (0,48).

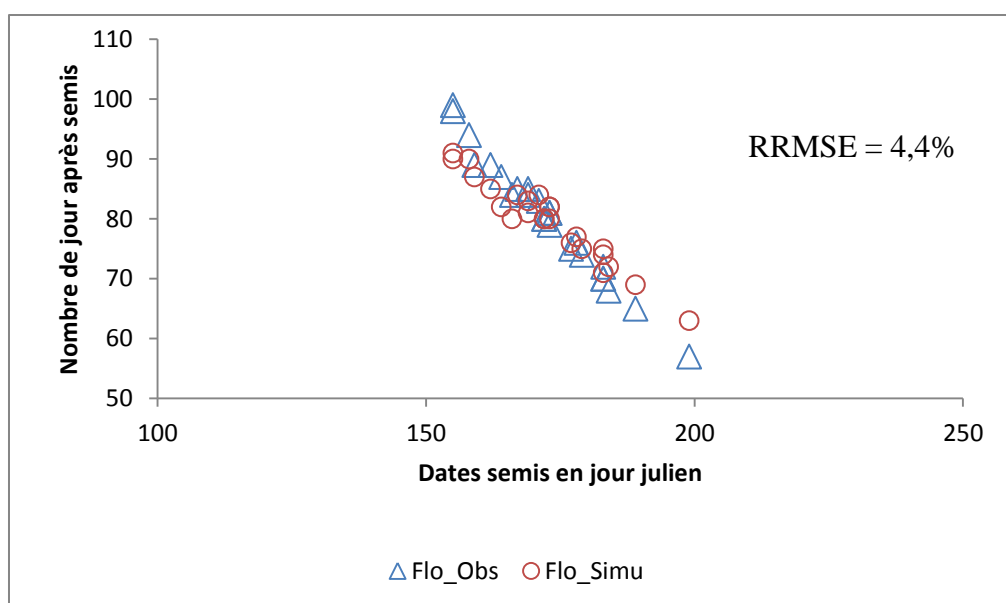


Figure 9 : Comparaison du nombre de jour observé et simulé de la floraison en fonction de la date de semis.

Flo_Obs = floraison observée, Flo_Simu = Floraison simulée.

Les constantes thermiques ont été calibrées en fonction des principaux stades phénologiques pris en compte dans le modèle (*cf figure 6*). Le calage du modèle a été jugé bon entre les valeurs simulées et observées des stades 3 et 6. L'erreur quadratique moyenne relative est de

1,35% pour le stade 3 et 1,34% pour le stade 6 entre les dates observées et celles simulées. L'écart obtenu est relativement faible pour les deux stades, respectivement 1 jour pour le stade 3 et aucun écart pour le stade 6 (*tableau 5*). Ainsi, à travers ces résultats nous pouvons dire sans risque de se tromper que le modèle est approprié pour estimer les différents stades phénologiques du sorgho.

Tableau 5: Ajustement de la durée des stades simulés et observés

Stades phénologique	Jour julien observé	Jour julien simulé	RRMSE en %	Biais en nombre de jour
Croissance rapide à Laimax	253	252	1,35	1
Maturité physiologique	293	293	1,34	0

Après l'ajustement, les constantes thermiques obtenues pour le calage final du modèle ont été de 380 °Cj pour la phase végétative1 (Levée-début croissance rapide) et 440 °Cj pour la phase végétative2 (croissance rapide à LAImax). Pour la phase de reproduction, la somme de température obtenue a été de 290 °Cj (LAImax à formation des graines) et 250°Cj pour le début de la sénescence et fin de cycle de la plante. Dans le *tableau 6* figurent les constantes thermiques des cinq stades calés dans le modèle.

Tableau 6 : Constantes thermiques après paramétrage du modèle

N° Stade	Nom du stade	Constante thermique en degré jour (°CJ)
1	Levée à croissance rapide	380
2	Croissance rapide à Laimax	440
3	Laimax à début formation des graines	290
4	Début formation des graines à début sénescence	250
5	Début sénescence à la récolte	250

3.1.2 Calage du rendement grain

Pour le rendement en grain, les valeurs Cgrain et CgrainV0 retenues pour les simulations de rendement Yw sont respectivement de 2185 et -24632 gMSj⁻¹. Le taux d'augmentation journalière de l'indice de récolte (Vitircarb) a été fixé à 0,0093 g grain.g MS⁻¹j⁻¹. Le tableau

suivant donne la synthèse des valeurs obtenues par calage du modèle. Le tableau suivant donne les valeurs des paramètres obtenues par calage du modèle

Tableau 7 : Valeurs des paramètres obtenues par calage du modèle

Paramètres	Description	Unité	Valeurs	Auteurs
Kmax	Coefficient cultural		1,6	(Affholder, 1997)
DLAImax	le taux de croissance quotidien maximal du LAI	(m ² .m ² .jour ⁻¹)	0,0016	Calé dans le modèle
Vitircarb	Augmentation journalière de l'indice de récolte	grain.g MS ⁻¹ .j ⁻¹	0,0093	Calé dans le modèle
SensPhot	sensibilité à la photopériode	-	1	Calage du modèle
MOPP	Seuil de durée du jour à partir duquel la photopériode agit sur le développement	Heures	12,75	Calage du modèle
Cgrain		Nombre	2185	calculé
CgrainV0			-24632	calculé

3.2 Estimation du rendement permis par l'eau

La *figure 10* présente les rendements moyens observés dans l'essai pour chaque traitement et chaque année, en fonction de Yw simulé par PYE après calage. Les rendements simulés Yw sont supérieurs aux rendements observés conformément à ce qu'on pouvait attendre. Mais le plus surprenant est que la plupart de rendements obtenus dans le traitement OIF est sensiblement inférieure aux rendements simulés.

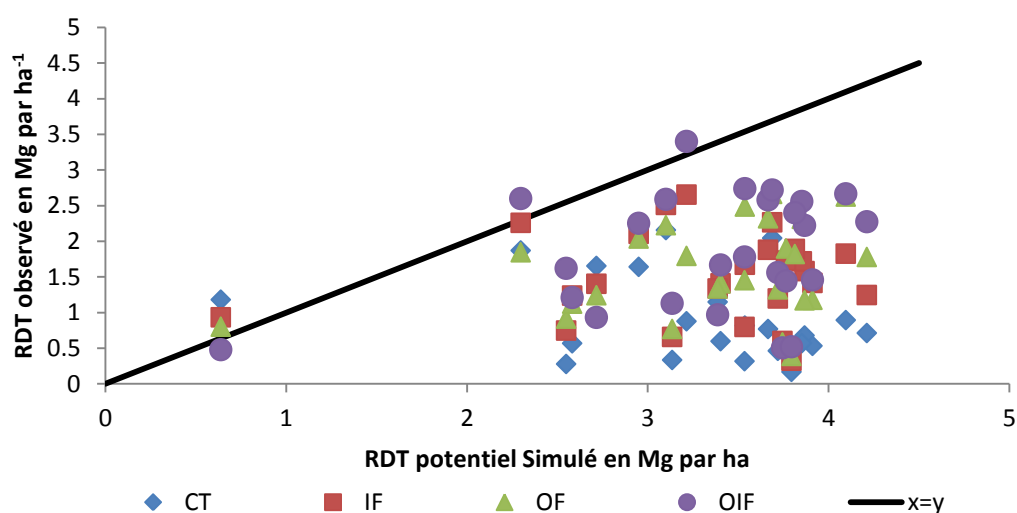


Figure 10 : Water limited Yield : Traitement de contrôle = CT, engrais organique = OF, engrais inorganique = IF, engrais organique et inorganique = OIF.

3.3 Estimation de l'écart des rendements

L'écart de rendement absolu obtenu entre le rendement potentiel limité par l'eau et le rendement observé est de 3,04 Mg ha⁻¹ pour le traitement de contrôle sans fertilisation (CT), 2,33 Mg ha⁻¹ pour le traitement avec engrais minéral (IF), 2,12 Mg ha⁻¹ pour le traitement avec fumure organique (OF), et 1,72 Mg ha⁻¹ pour la forte fertilisation (OIF) (combinaison IF et OF) en moyenne pendant la première période de l'expérience (1965-1979). L'écart de rendement est faible pour les traitements OIF et OF par rapport aux traitements CT et IF (OIF<OF<IF<CT). L'analyse de variance a montré que l'effet traitement était significatif sur l'écart de rendement ($p < 0,05$). Les traitements sont statistiquement différents les uns des autres (*tableau 8*). Un effet année a également été observé, mais l'écart moyen absolu reste toujours faible pour OIF par rapport aux autres traitements à l'exception des années 1965 (début de l'expérience) et 1968 (changement de rotation) où les traitements étaient statistiquement équivalents (voir annexe 3).

En seconde période (1980-1989), l'écart de rendement moyen est respectivement de 1,34 Mg ha⁻¹, 1,12 Mg ha⁻¹, 1,19 Mg ha⁻¹ et 1,13 Mg ha⁻¹ pour CT, IF, OF et OIF. L'analyse de variance n'a montré aucun effet significatif des traitements. L'écart de rendement moyen pendant la seconde période est statistiquement équivalent pour tous les traitements quel que soit le niveau de fertilisation.

Tableau 8 : Ecart moyen absolu entre Yw et les rendements observés en moyenne en première et seconde période de l'expérience

Traitements	Ecart de rendement	
	Période 1	Période 2
CT	3,04 a	1,34 a
IF	2,33 b	1,12 a
OF	2,12 c	1,19 a
OIF	1,72 d	1,13 a

Traitement de contrôle = CT, engrais organique = OF, engrais inorganique = IF, engrais organique et inorganique = OIF.

Pendant la première période de l'essai, les rendements relatifs ont varié entre 0,16 et 0,53 en fonction des traitements (*figure 11a*). Le rendement relatif moyen pour les niveaux de fertilisation (CT, IF, OF) sont respectivement de 16% $\pm 1,5$; 37% $\pm 4,6$ et 41% ± 4 , de Yw. Par contre, celui de OIF était à 53% ± 6 de Yw. En seconde période, le rendement relatif était compris entre 0,63 et 0,65 en fonction des traitements (*Figure 11b*). La moyenne relative observée par traitement était de 65% ± 14 pour CT, jusqu'à 69% ± 10 pour IF, 65% ± 8 pour

OF et $63\% \pm 8$ pour OIF. Pendant la première période, les rendements relatifs croissent en fonction du niveau de la fertilisation alors qu'en seconde période ils sont similaires quel que soit le traitement (*figure 11b*). L'erreur standard est moins importante en première période mais plus élevée pour les traitements OIF et OF que les traitements CT et IF. En seconde période, l'erreur standard est élevée pour tous les traitements mais plus importante pour les traitements CT et IF que pour les traitements OIF et OF.

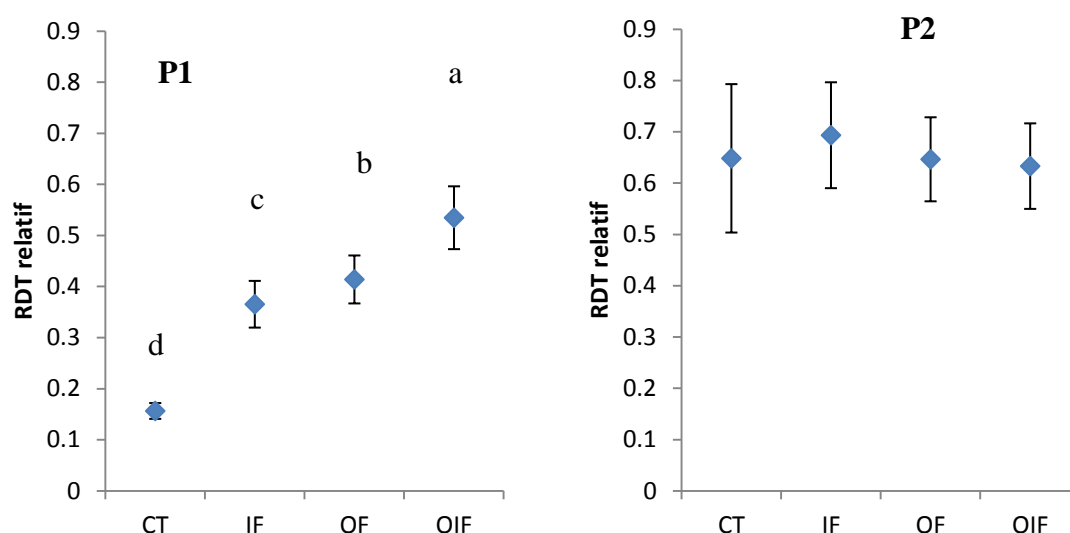


Figure 11: Rendement relatif moyen en fonction de la fertilisation par période :

P1 = période 1 ; P2 = période 2. Traitement de contrôle = CT, engrais organique = OF, engrais inorganique = IF, engrais organique et inorganique = OIF.

3.4 Gestion de la fertilité du sol à long terme

L'analyse de variance du rendement relatif au cours du temps a montré une différence significative entre les niveaux de fertilisation ($p < 0,05$). En première période un effet significatif a été observé pour les traitements OF et OIF. L'effet résiduel de la matière organique apportée au coton a montré un effet significatif sur l'augmentation des rendements du sorgho au cours du temps par rapport aux traitements sans engrais et recevant de l'engrais minéral seul. L'effet est particulièrement visible avec le traitement OF ($R^2 = 0,60$) que pour le traitement OIF ($R^2 = 0,35$). Par contre aucun effet significatif n'a été observé pour les traitements CT et IF. Le traitement de contrôle a un rendement faible par rapport aux autres traitements mais stable durant cette période (*figure 12*).

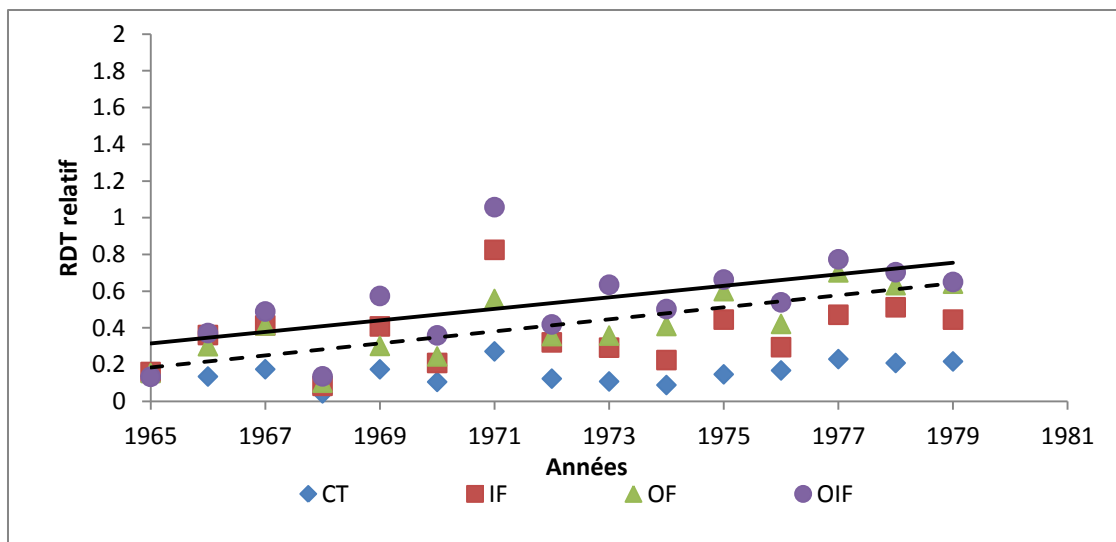


Figure 12 : Evolution du rendement relatif dans le temps pendant la première période (1965-1979)

Traitement de contrôle = CT, engrais organique = OF, engrais inorganique = IF, engrais organique et inorganique = OIF. Les courbes de tendance sont présentées pour expliquer l'effet significatif à $p < 0,05$. Le trait plein indique l'effet pour OF, le trait pointillé indique l'effet pour OIF

En seconde période, l'analyse de variance n'a montré aucune différence significative entre les traitements quel que soit le niveau de fertilisation. L'apport de la fertilisation intensive n'a pas eu d'effet significatif sur les rendements par rapport aux autres traitements. Le traitement de contrôle CT qui avait un rendement très en dessous de Y_w en première période a répondu à l'apport d'engrais en seconde période (*figure 13*). Son rendement relatif moyen atteint jusqu'à 65% de Y_w au même niveau que OF (65%) pendant la seconde période alors que celui de OIF est à 63% de Y_w .

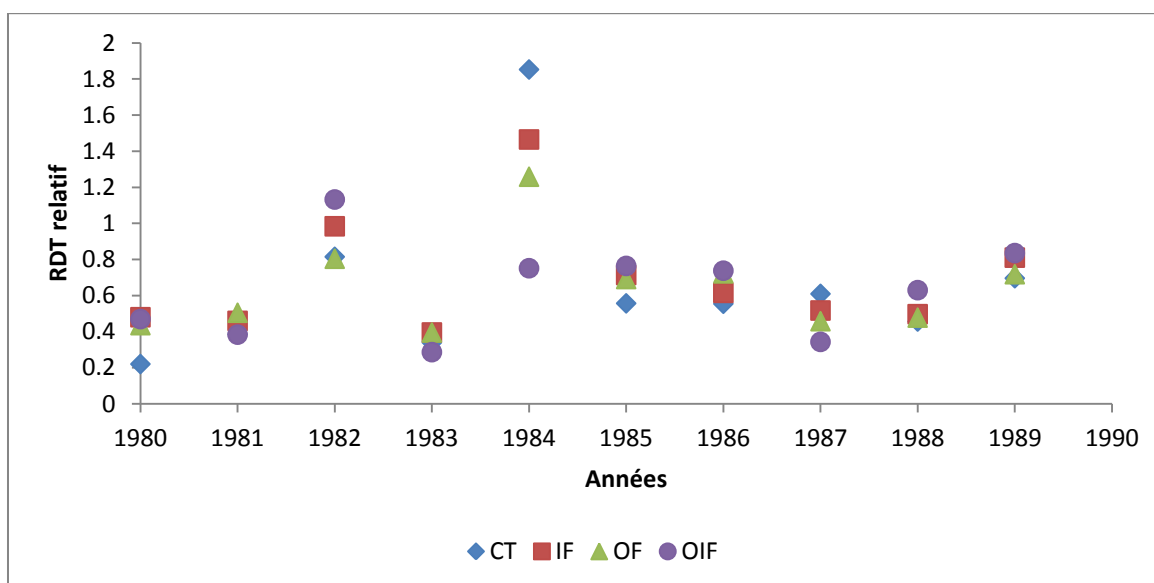


Figure 13 : Evolution du rendement relatif en fonction du temps en seconde période (1980-1989)

Traitement de contrôle (CT), engrais organique (OF, engrais inorganique (IF), engrais organique et inorganique (OIF).

4. DISCUSSION

4.1 Paramétrage du modèle

Les résultats d'estimation des paramètres de sensibilité à la photopériode, de la prédiction de la floraison et de la maturité complète ont montré que le modèle PYE simule bien le développement phénologique du sorgho. La valeur 1 de Sensphot obtenue indique que la variété de sorgho utilisée est très sensible à la photopériode, comme démontré par Traoré et al. (2011). La valeur du MOPP est également cohérente avec celle trouvée par plusieurs autres auteurs (Folliard et al., 2004; Kouressy et al., 2008; Sanon et al., 2014).

Par contre, une bonne simulation de rendement grain demande des données comme par exemple les composantes de rendements. La méthode utilisée pour calculer les valeurs de Cgrain et CgrainV0 a permis au modèle de simuler un rendement limité par l'eau. En raison d'une faible sensibilité au stress hydrique, plusieurs points de rendement n'étaient pas au potentiel (*cf figure 10*) malgré le paramétrage du modèle avec les rendements des parcelles les plus fertilisées. Il est donc possible que le modèle ne soit pas assez précis pour simuler le Yw dans les conditions de l'essai ou que le manque des données de composantes de rendements pour le calage du modèle fait que la précision du modèle ne soit pas meilleure. Dans le cadre de cette étude nous n'avons pas mesuré la précision du modèle mais plusieurs études ont montré que si les modèles de ce type sont bien calés, la précision se situerait autour d'une RRMSE de 20% pour STICS (Brisson et al., 2001), ou même de PYE entre 15 et 33% (Affholder, Scopel, Neto, & Capillon, 2003).

4.2 Estimation du rendement limité par l'eau (Yw)

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi un modèle ne prenant en compte que le climat, les propriétés du sol et les caractéristiques de l'espèce. Le modèle est peu gourmand en données d'entrées ce qui est adapté à notre étude puisque nous disposons de peu de données observées (manque de composantes du rendement). L'intérêt ici était donc d'utiliser un modèle simple qui puisse être paramétré avec les données disponibles.

Les résultats des simulations ont donné un écart important entre Yw et les rendements observés de l'essai. Plusieurs points des parcelles observées fortement fertilisées censés être au potentiel (traitement OIF) ont été mal simulés par le modèle (*cf figure 10*). Il est possible que ces points n'aient pas atteint le rendement potentiel limité par l'eau (Yw), probablement à cause d'excès d'eau pendant ces années pouvant provoquer l'anoxie du sol. Le maximum de rendement observé de l'essai a été réalisé avec une pluviométrie moyenne de 710 mm en 1971. On observe cependant, que pour certaines années, les précipitations sont supérieures (*cf figure 4*) mais les rendements n'atteignent pas le niveau de 1971. Cette situation peut

s'expliquer par le fait qu'en 1971 les conditions de pluie, de température et de rayonnement ont dû être particulièrement favorables à l'élaboration des rendements grains. La droite de rendement Y_w (*figure 10*) n'est pas ajustée à l'ensemble des points OIF, car le modèle a été calé de manière à ce qu'il simule le rendement maximum observé de l'essai, considéré ici comme ayant atteint le potentiel. En raison de cette hypothèse, les simulations de Y_w et les écarts de rendements ont eu des valeurs relativement élevées. Néanmoins, les valeurs de rendements obtenues de nos simulations après calage du modèle reproduisent bien l'amplitude des rendements moyens observés de l'essai.

L'utilisation d'un modèle simple pour analyser les écarts de rendement est une approche qui peut être une référence, car le modèle élimine les effets des pratiques culturales (Affholder et al., 2013; Ittersum et al., 2013). Cependant pour un bon paramétrage du modèle, il est important de disposer des données climatiques de bonne qualité, des mesures réelles des parcelles d'essai ou chez des agriculteurs et aussi que le modèle soit bien calé sur le cultivar utilisé. Dans le cadre de cette étude, les données climatiques ont été mesurées à l'aide de la station météorologique de N'tarla, qui est une station de référence au Mali et dans la sous région. Les données de l'expérimentation étaient stockées et soigneusement gardées dans une base de données. Cependant, on aurait pu connaître la précision du modèle dans cette étude si nous disposions les composantes de rendement pour caler C_{grain} et $C_{grainV0}$.

4.3 Causes de la variabilité des rendements

Pendant la première période, l'apport de matière organique a eu un effet positif sur le maintien ou l'amélioration des rendements. Les traitements OIF et OF ont respectivement eu un rendement relatif de $53\% \pm 6,1$ et $41\% \pm 4,7$ de Y_w . Tandis que les traitements CT et IF avaient un rendement relatif de $16\% \pm 1,5$ et $37\% \pm 4,6$ du potentiel. Le traitement de contrôle qui ne bénéficiait ni d'engrais, ni d'arrière effets de la fertilisation apportée au cotonnier avait un rendement relatif faible (entre 0,1 et 0,2) très loin de Y_w . Ce constat a été fait par plusieurs auteurs sur le fait que le manque de fertilisation des cultures sur les sols tropicaux diminuait fortement les rendements : (Affholder et al., 2013; Pablo Tittonell & Giller, 2013) etc. Pendant la seconde période, le sorgho, en plus de bénéficier de l'arrière effet de la fertilisation apportée au coton était lui-même fertilisé. Nos résultats n'ont montré aucune différence significative entre les différents niveaux de fertilisation. Le traitement de contrôle qui a bénéficié de l'engrais pendant cette période a répondu à l'apport de la fertilisation. Son rendement relatif moyen était équivalent à celui de OIF. Ce résultat confirme celui trouvé par (Ripoche et al., 2015) et montre clairement la réponse du sol à la fertilisation même après une longue période sans apport organique. Ceci contredit la plupart des études sur l'augmentation

des rendements avec le maintien durable de la fertilité des sols à long terme et le déclin du sol après plusieurs années sans apport organique (Kintché et al., 2015; P. Tittonell, Vanlauwe, Corbeels, & Giller, 2008). Notre environnement d'étude est sujet à des fortes variabilités interannuelles et intra-annuelles des précipitations (Sultan, Baron, Dingkuhn, Sarr, & Janicot, 2005), qui se traduisent par des retards mais aussi des irrégularités importantes des pluies au cours de la saison. Des fortes pluies peuvent être enregistrées pendant les périodes clés de croissance, comme des périodes de sécheresse souvent sévères peuvent aussi intervenir pendant les stades importants de la culture. On peut aussi observer un arrêt précoce des pluies provoquant le non bouclage du cycle des cultures.

Les résultats de nos travaux durant la première période, montrent l'effet bénéfique de l'arrière effet de la fertilisation apportée au coton sur l'augmentation des rendements du sorgho dans le temps. Des effets significatifs de l'apport résiduel de la matière organique ont été observés. En seconde période, aucun effet n'a été observé malgré l'apport de fertilisation organo-minérale sous sorgho. Une forte variabilité des rendements a été observée au cours de l'expérience. Cette variabilité des rendements est due probablement à l'excès d'eau dans le sol dans un premier temps car le faible niveau de rendement du sorgho observé avec le traitement OIF durant certaines années peut être expliqué par le fait que les racines du sorgho ne supportant pas l'excès d'eau ont eu du mal à progresser et accéder aux éléments nutritifs disponibles. Il est possible aussi que la variabilité soit liée aux stress hydriques observés au cours de l'essai (*cf figure 10*). Dans ces conditions la forte fertilisation augmente le besoins en eau des plantes qui vont puiser beaucoup d'eau dans le sol. Ceci va contribuer à un épuisement du stock d'eau et une augmentation du stress hydrique. La conséquence de ce phénomène est que l'effet de la fertilité sur la consommation d'eau des cultures sous forte fertilisation peut devenir négatif au cours de certaines étapes du cycle comme le début de remplissage des grains. On peut donc assister à une forte augmentation de la biomasse aérienne pendant la phase végétative et une diminution des rendements lorsque le stress est sévère pendant la phase critique d'élaboration des rendements (Affholder, 1995). Il est possible enfin que la variabilité soit due à la faible densité de peuplement du sorgho occasionnée par des pertes des plants au cours du cycle liées soit à une période de stress sévère après semis ou à la pourriture des grains suite à l'excès d'eau. Ainsi, pour diminuer l'écart des rendements en zone sub-saharienne, une des stratégies possibles est de combiner des techniques culturales, d'amélioration de la fertilité des sols et d'économie d'eau dans les champs Gigou et al. (2006); Sawadogo (2011), afin de réduire les risques de productions

induits par la variabilité des précipitations qui devraient normalement augmenter avec l'intensification des cultures (Poeydebat, Balde, Affholder, & Muller, 2013).

4.4 Intérêt de l'estimation de Y_w par rapport à l'analyse de stabilité

L'intérêt de passer par la modélisation et surtout d'utiliser un modèle de simulation de rendement potentiel limité par l'eau était d'aller plus loin dans l'analyse de l'évolution des rendements au cours du temps. Dans le cadre de cette étude Y_w a été estimé année par année et pour chaque traitement. L'écart entre les rendements simulés et ceux observés a été calculé pour chaque traitement afin d'étudier la variabilité des rendements au cours du temps. Nos résultats ont montré qu'une part importante de la variabilité des rendements est due à la variation interannuelle des pluies plutôt que liée à la fertilité des sols. Par contre, l'analyse de stabilité faite par Ripoche et al. (2015), montre plutôt que la variabilité des rendements est liée à la fluctuation interannuelle de l'environnement. Or la fluctuation interannuelle de l'environnement dépend elle-même de la fluctuation interannuelle des pluies donc du climat d'où l'intérêt de passer par l'estimation de Y_w afin d'étudier le poids du facteur le plus déterminant dans la variabilité des rendements au cours du temps.

5. CONCLUSION

Cette étude a été conduite à partir du dispositif expérimental de l'essai longue durée de la station de recherche Agronomique de N'Tarla au Mali. L'objectif était d'étudier l'impact du climat sur la variabilité des rendements dans le temps par voie de modélisation.

On a pu montrer qu'il était possible d'utiliser le modèle de culture et de le paramétrer dans les conditions de la zone d'étude pour évaluer le poids du facteur hydrique dans la variabilité inter annuelle des rendements. Le paramétrage du modèle a été jugé satisfaisant pour simuler correctement le développement et la croissance du sorgho.

Les résultats de l'étude ont montré que l'écart moyen des rendements était très élevé en première période entre le rendement potentiel limité par l'eau (Y_w) et le rendement observé pour les traitements (CT, IF et OF) respectivement sans fertilisation, avec de l'engrais minéral et avec de la fumure organique. Cet écart était faible pour le traitement avec forte fertilisation (OIF) pendant cette période. En seconde période, l'écart de rendement était similaire pour tous les traitements y compris le traitement de contrôle. Cependant, une forte variabilité des rendements a été observée pendant l'expérience. Cette variabilité est liée dans un premier temps à la variabilité des pluies donc du climat. Cela justifie le choix du modèle utilisé dans le cadre de cette étude qui calcule un rendement potentiel limité par l'eau (Y_w) en ne prenant en compte que le facteur climat. Aussi, le traitement de contrôle (CT) qui ne recevait pas d'apport de fertilisants en première période a répondu à l'apport de la fertilisation en seconde période et cela même après une longue période (15 ans) sans apport organique. Ce résultat montre qu'il est possible d'atteindre le même niveau de rendement avec l'apport minéral qu'avec la fertilisation organo-minérale maintenue pendant plusieurs années en zone subsaharienne. Dans un second temps, il est possible que la variabilité soit due à l'apport intensif de la fertilisation du sorgho qui n'a pas supporté la forte fertilisation durant les années avec excès d'eau ou en présence d'un stress hydrique important.

La méthode utilisée pour analyser la variabilité des rendements au cours du temps est une alternative intéressante à la méthode « analyse de stabilité ». Elle est potentiellement plus rigoureuse à condition de disposer des données appropriées pour estimer les principaux paramètres du modèle utilisé. Cependant, le manque de données des composantes de rendement, des mesures directes du LAI ou de la réserve utile du sol peut être considéré comme une limite à la présente étude.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Affholder, F. (1995). Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crops Research*, 41(2), 109–121. [http://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00115-S](http://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00115-S)
- Affholder, F. (1997). Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research*, 52(1-2), 79–93. [http://doi.org/10.1016/S0378-4290\(96\)03453-3](http://doi.org/10.1016/S0378-4290(96)03453-3)
- Affholder, F., Poeydebat, C., Corbeels, M., Scopel, E., & Titttonell, P. (2013). The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Research*, 143, 106–118. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.021>
- Affholder, F., Scopel, E., Neto, J., & Capillon, A. (2003). Diagnosis of the productivity gap using a crop model. Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil. *Agronomic Sustainable Development*, 25, 145–149. <http://doi.org/10.1051/agro>
- Affholder, F., Titttonell, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., & Wery, J. (2012). Ad hoc modeling in agronomy: What have we learned in the last 15 years? *Agronomy Journal*, 104(3), 735–748. <http://doi.org/10.2134/agronj2011.0376>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines fo computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage*, 56, 1–15.
- Ballo, D. B. (1997). Effet des systèmes culturaux sur le statut organique des sols ferrugineux tropicaux du Mali: DEA en science du sol, soutenu le 01juillet 1997 à l'ENSA-Montpellier.
- Baron, C., Sultan, B., Balme, M., Sarr, B., Traore, S., Lebel, T., ... Dingkuhn, M. (2005). From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 360(1463), 2095–2108. <http://doi.org/10.1098/rstb.2005.1741>
- Bélières, J.-F. (2009). Intégration des petits producteurs ouest enseignements à partir de l'exemple de la filière coton au Mali : CSD, Windhoek, Namibia 9-10 February., p23.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., ... Sinoquet, H. (2003). An over view of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18 (309-332).
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., ... Delécolle, R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18(5-6), 311–346. <http://doi.org/10.1051/agro:19980501>
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeaou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., ... Justes, E. (2001). STICS: a generic model for simulating cropsand their water and nitrogen balances.II.

- Model validation for wheat and maize. *Agronomic Sustainable Development*, 25(August 2015), 145–149. <http://doi.org/10.1051/agro>
- Dingkuhn, M., Kouressy, M., Vaksman, M., Clerget, B., & Chantreau, J. (2008). A model of sorghum photoperiodism using the concept of threshold-lowering during prolonged appetence. *European Journal of Agronomy*, 28(2), 74–89. <http://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.005>
- Evans, L.T, 1993. (1993). Crop évolution, adaption and Yield. *Combridge University Press* Combridge UK.
- Fao. (2006). World reference base for soil resources 2006. *A framework for international classification, correlation and communication* ISBN 92-5-105511-4 p127..
- Fao. (2010). Etude sur le financement de l’Agriculture et du monde rural: Rapport complémentaire - Analyse des filières agricoles : coton, riz, mangue, pomme de terre, échalote au Mali., p38.
- Folliard, a., Traoré, P. C. S., Vaksman, M., & Kouressy, M. (2004). Modeling of sorghum response to photoperiod: A threshold-hyperbolic approach. *Field Crops Research*, 89(1), 59–70. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.006>
- Gigou, J., Traoré, K., Giraudy, F., Coulibaly, H., Sogoba, B., & Doumbia, M. (2006). Aménagement paysan des terres et réduction du ruissellement dans les savanes africaines. *Cahiers Agricultures Vol. 15, N° 1, Janvier-Février 2006, 15*, 116–122.
- IER/CMDT/OHVN, R. (1998). Mémoire de réunion de concertation sur la baisse de rendement de la variété NTA 88-6 au cours de la campagne97/98. N’Tarla, Mali p24.
- IRCT. (1969). Expérimentation régionale cotonnière. Station de N’Tarla, République du Mali p34.
- Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittone, P., & Hochman, Z. (2013). Field Crops Research Yield gap analysis with local to global relevance — A review. *Field Crops Research*, 143, 4–17. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52(3), 197–208. [http://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](http://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3)
- Kanté, S. (2001). Gestion de la fertilité des sols par classe d’exploitation au Mali-Sud: *thèse soutenu à Wageningen University* ISBN 90-5808-569-4.
- Kintché, K., Guibert, H., Bonfoh, B., & Tittone, P. (2015). Long-term decline in soil fertility and responsiveness to fertiliser as mitigated by short fallow periods in sub-Saharan area of Togo. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 333–350. <http://doi.org/10.1007/s10705-015-9681-x>
- Kouressy, M., Dingkuhn, M., Vaksman, M., & Heinemann, A. B. (2008). Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and

- sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(3), 357–371. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.009>
- Lemaire, G., Charrier, X., & Hébert, Y. (1996). Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions . *Agronomie*, 16(4), 231–246. <http://doi.org/10.1051/agro:19960403>
- Luo, Q. (2011). Temperature thresholds and crop production: A review. *Climatic Change*, 109(3-4), 583–598. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0028-6>
- Pieri, C. (1989). Fertilité des terres de Savanes: *Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara*, CIRAD-IRAT Montpellier p344.
- Poeydebat, C., Balde, A. B., Affholder, F., & Muller, B. (2013). Identification of the key factors controlling the yields , and identification of related key diagnostics relevant for the assessment of climate model simulations Part I□: Pearl millet. *Espace*, 26.
- Pol, F., & Traore, B. (1993). Soil nutrient depletion by agricultural production in Southern Mali %J Nutrient Cycling in Agroecosystems, 36, 79–90 ST – Soil nutrient depletion by agricultura. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/BF00749951>
- Pouya, M., Bonzi, M., Gnankambary, Z., Traore, K., Ouédraogo, J., Somé, A., & Sédogo, M. (2013). Pratiques actuelles de gestion de la fertilité des sols et leurs effets sur la production du cotonnier et sur le sol dans les exploitations cotonnières du Centre et de l'Ouest du Burkina Faso. *Cahier D'agriculture*, vol.22, n°4, Juillet-Août 2013, 22, 282–292. <http://doi.org/10.1684/agr.2013.0643>
- Ripoche, A., Crétenet, M., Corbeels, M., Affholder, F., Naudin, K., Sissoko, F., ... Tittonell, P. (2015). Cotton as an entry point for soil fertility maintenance and food crop productivity in savannah agroecosystems–Evidence from a long-term experiment in southern Mali. *Field Crops Research*, 177, 37–48. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.013>
- Ritchie and G. Alagarswamy. (1989). Physiology of Sorghum and Pearl Millet: *Simulation of Sorghum and Pearl Millet Phenology*.
- Sanon, M., Hoogenboom, G., Traoré, S. B., Sarr, B., Garcia Y Garcia, a., Somé, L., & Roncoli, C. (2014). Photoperiod sensitivity of local millet and sorghum varieties in West Africa. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 68, 29–39. <http://doi.org/10.1016/j.njas.2013.11.004>
- Sawadogo, H. (2011). Using soil and water conservation techniques to rehabilitate degraded lands in northwestern Burkina Faso. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9(1), 120–128. <http://doi.org/10.3763/ijas.2010.0552>
- Sultan, B., Baron, C., Dingkuhn, M., Sarr, B., & Janicot, S. (2005). Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128(1-2), 93–110. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.08.005>

- Sultan, B., Janicot, S., Baron, C., Dingkuhn, M., Muller, B., Traoré, S., & Sarr, B. (2008). Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest: une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse*, 19(1), 29–37. <http://doi.org/10.1684/sec.2008.0122>
- Tittonell, P., & Giller, K. E. (2013). When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research*, 143, 76–90. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.007>
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Corbeels, M., & Giller, K. E. (2008). Yield gaps, nutrient use efficiencies and response to fertilisers by maize across heterogeneous smallholder farms of western Kenya. *Plant and Soil*, 313(1-2), 19–37. <http://doi.org/10.1007/s11104-008-9676-3>
- Traoré, B. (2007). Utilisation d'un modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation comme interface de dialogue entre la recherche et les agriculteurs pour l'adoption de nouvelles options techniques de culture. *Master2 en Agronomie et Agro-Alimentaire, Option : Système de culture Intégré, soutenu le 21 septembre 2007 à Montpellier SupAgro*.
- Traoré, B., Corbeels, M., Wijk, V., Mark, T., Rufino, M., & Giller, K. (2013). Effects of climate variability and climate change on crop production in southern Mali. *European Journal of Agronomy*, 49, 115–125. <http://doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.004>
- Traoré, S. B., Alhassane, A., Muller, B., Kouressy, M., Somé, L., Sultan, B., ... Baron, C. (2011). Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric Science Letters*, 12(1), 89–95. <http://doi.org/10.1002/asl.295>

7. ANNEXE

Annexe 1 : Liste des paramètres du modèle

Nom du Paramètre	Description
Tdmin	Température base de développement (°C)
Tdmax	Température maximale de développement (°C)
Tcmin	Température base de conversion de la lumière en biomasse (°C)
Tcmax	Température maximale de conversion de la lumière en biomasse (°C)
Tcop	Température optimale de la conversion de lumière en biomasse (°C)
Extin	Coefficient d'extinction du rayonnement
dlaimax	Vitesse de croissance maximale de la surface foliaire d'une plante par degré ($m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$)
LAImax	Indice de surface foliaire maximum
Ebmax	Coefficient de conversion maximale du rayonnement
IRmax	Indice de récolté maximal
P1grain max	Poids maximal de 1 grain (g)
Ngrain	Nombre de grain par m^2
Cgrain	Coefficient empirique de croissance journalière du nombre de grains pendant la durée de remplissage des grains, par unité de matière sèche produite à cette période (gMS^{-1})
CgrainV0	Nombre de grains mis en place si croissance nulle pendant la durée de remplissage des grains ($grain.m^{-2}$)
Vitircarb	Augmentation journalière de croissance de l'indice de récolté ($grain.g MS^{-1}j^{-1}$)
SensPhot	sensibilité à la photopériode
MOPP	Seuil de durée du jour à partir duquel la photopériode agit sur le développement
Kmax	Coefficient cultural (avec ETP Penman)
DeltaRacMax	Croissance du front racinaire par unité de temps thermique ($cm/^\circ Cj$)
Zracmax	Cote maximale atteignable par les racines (m)
CO2c	Concentration en CO2 de l'atmosphère (ppm)
CTlevée	Constante thermique pour la germination (degré jours)
Tger	Température de base pour la germination (°C)

Annexe 2 : Ecart de rendement et pluie enregistrée par période

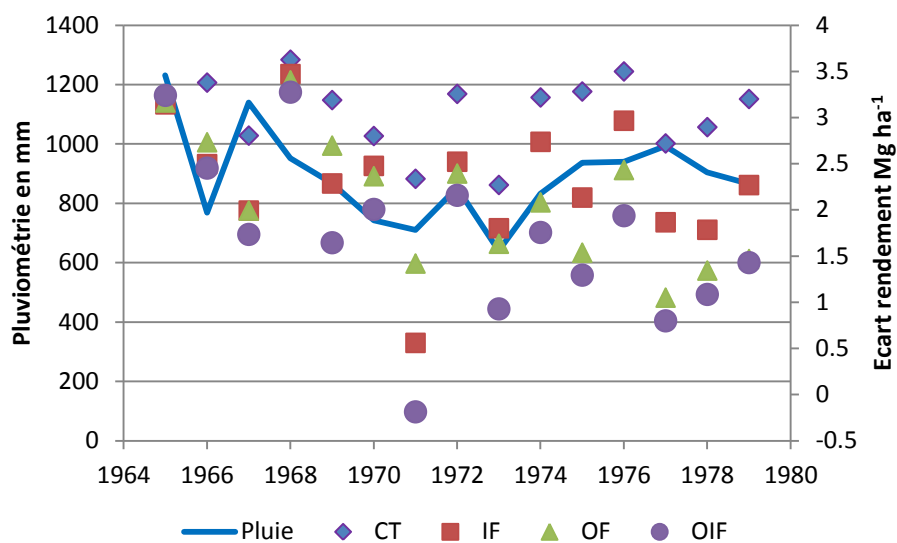


Figure 14 : Ecart moyen de rendement entre Yw et Ya et pluie enregistrée : Période 1 de l'expérience

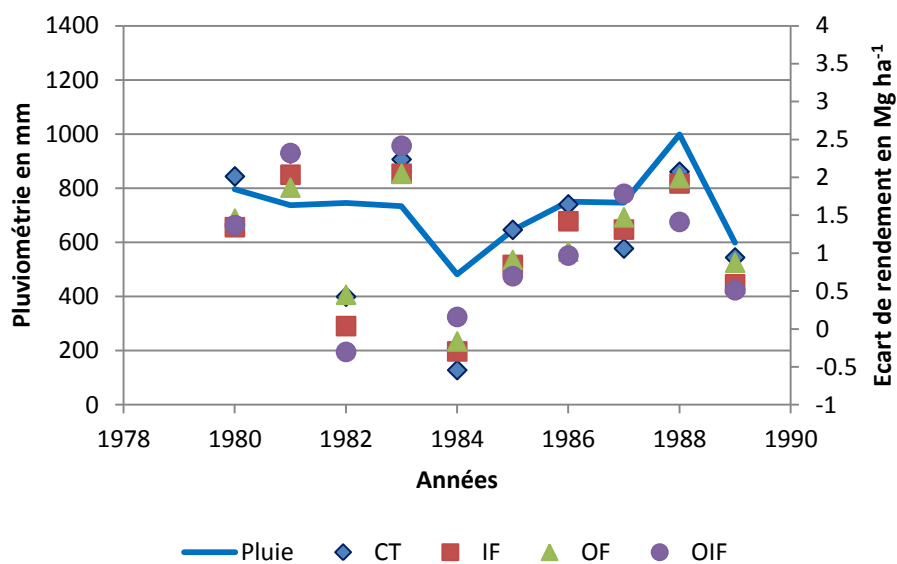


Figure 15 : Ecart moyen de rendement entre Yw et Ya, et pluie enregistrée : Période 2 de l'expérience.

Annexe 3 : Ecart moyen absolu entre Yw et les rendements observés en première période de l'expérience.

Années	Traitements	Ecart de rendement en Mg ha ⁻¹
1965	CT	3,24 a
1965	IF	3,22 a
1965	OF	3,16 a
1965	OIF	3,14 a
1966	CT	3,37 a
1966	IF	2,73 b
1966	OF	2,49 c
1966	OIF	2,45 d
1967	CT	2,80 a
1967	IF	1,99 b
1967	OF	1,99 b
1967	OIF	1,73 b
1968	CT	3,22 a
1968	IF	3,14 a
1968	OF	3,16 a
1968	OIF	3,24 a
1969	CT	3,18 a
1969	IF	2,28 b
1969	OF	2,69 b
1969	OIF	1,64 c
1970	CT	2,80 a
1970	IF	2,47 ab
1970	OF	2,36 bc
1970	OIF	2,00 c
1971	CT	2,33 a
1971	IF	0,55 c
1971	OF	1,41 b
1971	OIF	-0,18 d
1972	CT	3,25 a
1972	IF	2,52 b
1972	OF	2,39 b
1972	OIF	2,15 b
1973	CT	2,26 a
1973	IF	1,80 b
1973	OF	1,63 b
1973	OIF	0,92 c
1974	CT	3,21 a
1974	IF	2,73 ab
1974	OF	2,08 bc
1974	OIF	1,75 c
1975	CT	3,28 a
1975	IF	2,13 b
1975	OF	1,53 b
1975	OIF	1,29 b
1976	CT	3,49 a
1976	IF	2,96 ab
1976	OF	2,43 bc

1976	OIF	1,93 c
1977	CT	2,71 a
1977	IF	1,86 b
1977	OF	1,05 c
1977	OIF	0,79 c
1978	CT	2,89 a
1978	IF	1,78 b
1978	OF	1,34 c
1978	OIF	1,08 c
1979	CT	3,20 a
1979	IF	2,26 b
1979	OF	1,46 c
1979	OIF	1,42 c

Traitement de contrôle (CT), engrais organique (OF, engrais inorganique (IF), engrais organique et inorganique (OIF). Les différences significatives ont un sens par année représentées par les lettres a,b,c,d.

RESUME

En zone Soudano-sahélienne du Mali, les systèmes de culture les plus couramment pratiqués sont des rotations coton-céréales ou coton-céréales-légumineuses. La culture du coton bénéficie plus d'apport de fertilisants de la part des agriculteurs que les cultures céréalières qui bénéficient de l'effet résiduel des applications d'engrais organiques et minéraux utilisés sous le cotonnier. Plusieurs études ont montré l'insuffisance d'apport de fertilisation minérale ou organique pour le maintien des rendements élevés des cultures à long terme dans la zone subsaharienne. Dans cette étude, nous avons utilisé un essai longue durée conduit en station de recherche agronomique de N'tarla au Mali pour étudier l'évolution des rendements. Dans cet essai, une rotation coton-sorgho-arachide a été soumise à différents niveaux de fertilisation organo-minérale en deux périodes distinctes. Il s'agit d'un traitement sans engrais (CT), un traitement recevant de l'engrais minéral (IF), un traitement recevant de la fumure organique (OF) et une combinaison de la fertilisation organo-minéral (OIF). La première période va de 1965 à 1979 et la seconde de 1980 à 1989. L'objectif est d'identifier la part du climat et celle de la fertilisation organo-minérale dans l'évolution des rendements constatée dans l'essai. Pendant la première période, seul le coton a bénéficié de l'apport d'engrais organique et minéral. En seconde période le sorgho a bénéficié aussi de l'engrais organique et minéral. Le traitement de contrôle (CT) non fertilisé durant la première période a reçu de l'engrais chimique en seconde période. L'évolution des rendements a été étudiée à partir de l'analyse de l'écart entre les rendements observés (Y_a) de quatre niveaux de fertilisation et un rendement potentiel limité par l'eau « Water limited yield » (Y_w) à l'aide d'un modèle de simulation (PYE). En première période de l'expérimentation, l'écart de rendement était plus important pour les traitements CT et IF ($3,04 \text{ Mg ha}^{-1}$, $2,33 \text{ Mg ha}^{-1}$) que pour les traitements OF et OIF ($2,12 \text{ Mg ha}^{-1}$, $1,72 \text{ Mg ha}^{-1}$). L'apport de la matière organique a montré un effet significatif sur l'amélioration des rendements pendant cette période. Quelle que soit la quantité des pluies enregistrées le rendement relatif du traitement OIF était toujours proche du potentiel par rapport aux autres traitements durant cette période. En seconde période, l'écart de rendement était similaire pour tous les traitements quel que soit le niveau d'apport de fertilisant ($1,34 \text{ Mg ha}^{-1}$, $1,12 \text{ Mg ha}^{-1}$, $1,19 \text{ Mg ha}^{-1}$ et $1,13 \text{ Mg ha}^{-1}$) respectivement pour CT, IF, OF et OIF. La forte fertilisation OIF n'a montré aucun effet significatif sur l'amélioration des rendements dans le temps par rapport aux autres traitements fertilisés. Une forte variabilité interannuelle a été constatée entre les rendements pendant l'expérience. Cette variabilité des rendements implique des risques et incertitude importants qui pourraient expliquer les échecs des démarches d'intensification classique en zone subsaharienne à savoir l'utilisation de la fertilisation intensive (minérale et/ou organique).

Mots clés : système de culture, fertilisation, modèle de culture, potentiel yield estimator, rendement potentiel limité par l'eau, écart de rendement.